Э. А. РАБИНОВИЧ

СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Э. А. РАБИНОВИЧ

СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

ВТОРОЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для средних специальных учебных заведений

МОСКВА
«ЭНЕРГИЯ»
1978

31.21
Р12
УДК 621.3.01(076)

Рабинович Э. А.

Р12 Сборник задач и упражнений по общей электротехнике: Учебное пособие для техникумов. — 2-е изд., испр. — М.: Энергия, 1978. — 304 с., ил.

Сборник составлен применительно к программе этого предмета для техникумов, охватывает все разделы курса. В каждой главе сборника помещены задачи с подробным анализом и решениями.

Первое издание книги выпущено в 1972 г.

Сборник может быть полезен для самостоятельной работы инженерно-технических работников, желающих повысить свою квалификацию.

Р $\frac{30306\text{-}013}{051(01)\text{-}78}$ 62-78

31.21
6П2.1

© Издательство «Энергия», 1978 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исторические решения XXV съезда КПСС предусматривают дальнейший быстрый рост производства и потребления электрической энергии во всех отраслях народного хозяйства.

Пятилетним планом развития народного хозяйства на 1976—1980 годы предусмотрен рост производства электроэнергии до 1380 млрд. киловатт-часов в год. За пятилетие предстоит ввести в действие на электростанциях мощности в размере 71 млн. киловатт. При этом будут изготовлены энергетические блоки мощностью 500 и 800 тыс. киловатт, реакторные установки мощностью 1 млн. киловатт для атомных электростанций. Уже построен опытный участок линии электропередачи переменного тока напряжением 1150 тыс. вольт.

Бурное развитие электроэнергетической и электротехнической промышленности свидетельствует о широком научно-техническом прогрессе в нашей стране.

Отсюда понятно, какое значение приобретает для инженеров и техников любого профиля изучение электротехники.

Успешное изучение электротехники на основе правильного понимания физических процессов и приобретение необходимых навыков для решения производственных вопросов, а также расширение кругозора и углубления знаний учащихся может быть достигнуто лишь путем систематических упражнений и решений конкретных практических задач. Этим целям и призван служить предлагаемый сборник задач и упражнений по общей электротехнике, который должен дать учащемуся и преподавателю необходимый для упражнений материал.

Для облегчения самостоятельной работы учащихся над книгой в каждом параграфе помещены сначала задачи с анализом и решениями (обозначены звездоч-

ками), содержащие теоретические обобщения, а затем даны вопросы и упражнения к этим задачам, требующие применения одной или двух формул, приведенных в решениях; многие примеры решаются устно. В разделах «Вопросы и упражнения» даются также одна или две задачи, требующие выбора ответа. Эти задачи могут быть использованы для программированного самоконтроля или контроля знаний. При этом из одной задачи с выбором ответа можно получить много вариантов данной задачи путем перестановки вопросов и ответов.

После вопросов и упражнений помещены задачи для самостоятельных решений. К ряду задач даны краткие направляющие указания, которые облегчают подход к их решению. Задачи, содержащие общие данные, но с различными заданиями, подразделены на «условия», причем каждое условие в большинстве случаев является самостоятельным, не зависящим от других.

Все замечания и предложения по книге следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия».

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И КОНДЕНСАТОРЫ

1-1. СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. НАПРЯЖЕНИЕ И ПОТЕНЦИАЛ

1-1*. В электрическом поле пробный электрический заряд $+q$ перемещается по замкнутому пути *ambna* (рис. 1-1). Определить работу сил электрического поля.

Анализ и решение

Искомая работа равна 0, так как, пройдя замкнутый путь, пробный заряд вернется в исходную точку A и энергия электрического поля остается неизменной. Работа вдоль замкнутого пути *ambna*, равная сумме работ на участках *amb* и *bna*, выразится $W_{ambna} + W_{amb} + W_{bna} = 0$ или $W_{amb} = -W_{bna}$.

Знак минус в правой части полученного равенства показывает, что если работа W_{amb} совершается под действием сил электрического поля и будет положительной, то работа W_{bna} совершается сторонними силами (механическими) против сил электрического поля и будет отрицательной. Очевидно, что, изменив направление перемещения пробного заряда, получим такую же по абсолютному значению работу, только с обратным знаком, т. е. $-W_{bna} = W_{anb}$. Отсюда следует, что $W_{amb} = W_{anb}$, т. е. работа сил электрического поля не зависит от пути, по которому происходит перемещение заряда.

1-2*. Доказать, что в любом стационарном электрическом поле напряжение между любой парой точек поля равно разности потенциалов этих точек и не зависит от выбора точки нулевого потенциала.

Анализ и решение

Под потенциалом поля в любой его точке подразумевается напряжение между данной точкой поля и другой произвольно выбранной точкой поля, принимаемой за начало отсчета или за точку нулевого потенциала.

Рассмотрим задачу для трех случаев условного расположения точки нулевого потенциала:

а) правее точки $Б$; б) между точками A и $Б$; в) левее точки A (рис. 1-2, *а—в*). Направление линии электрического поля указано на рисунках стрелкой.

В первом случае (рис. 1-2, *а*) потенциалы точек A и $Б$ положительны, причем $\varphi_A > \varphi_Б$. Легко видеть, что напряжение $U_{AБ}$, численно равное работе, совершаемой силами электрического поля при перемещении единичного положительного заряда из точки A в точку $Б$, равно разности потенциалов этих точек:

$$U_{AБ} = W_{AБ}/q.$$

Здесь $U_{AБ}$ — напряжение в вольтах между двумя произвольными точками поля A и $Б$; $W_{AБ}$ — работа сил электрического поля в

джоулях, производимая при перемещении заряда q между указанными точками; q — переносимый заряд в кулонах.

Напряжение не зависит от того, является ли поле равномерным или неравномерным.

Напряжение между точками A и $Б$ электрического поля определяется по вышеприведенной формуле однозначно, так как работа $W_{АБ}$ не зависит от пути, по которому происходит перемещение заряда (задача 1-1):

$$\frac{W_{АБ}}{q} = \frac{W_{АО}}{q} - \frac{W_{БО}}{q}.$$

или

$$U_{АБ} = \varphi_A - \varphi_Б.$$

Здесь индексы при W показывают направление переноса заряда.

Направление поля показано вектором напряженности поля в точке A.

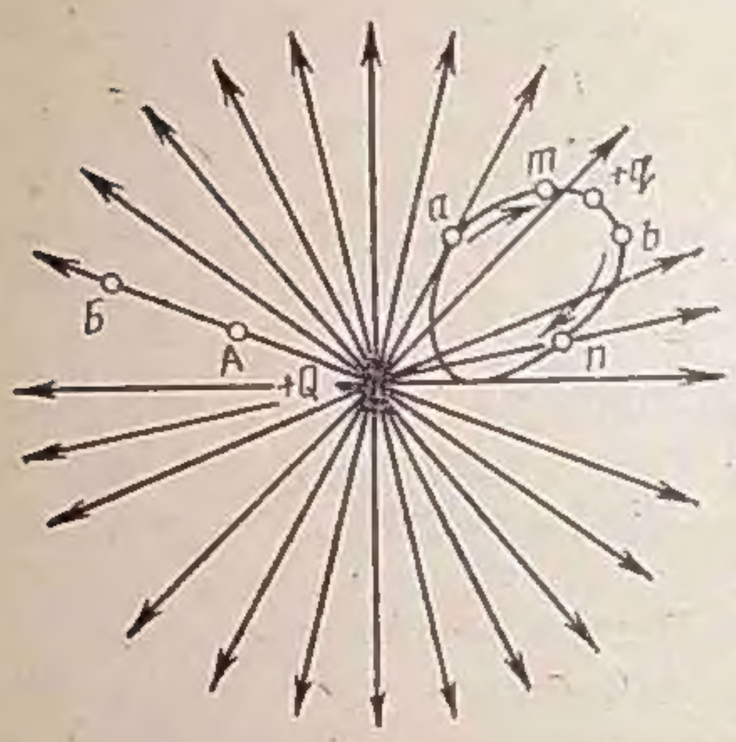


Рис. 1-1. К задачам 1-1, 1-9.

Рис. 1-2. К задачам 1-2, 1-3.

Во втором случае (рис. 1-2, *б*) потенциал точки A больше нуля $\varphi_A > 0$, потенциал точки $Б$ меньше нуля $\varphi_Б < 0$:

$$\varphi_A = \frac{W_{АО}}{q}; \quad \varphi_Б = \frac{W_{БО}}{q}.$$

Работа $W_{ОБ}$ совершается под действием сил электрического поля и будет положительной; работа $W_{БО}$ совершается против сил электрического поля и будет отрицательной. Следовательно,

$$W_{ОБ} = -W_{БО}.$$

Тогда напряжение между точками A и $Б$

$$U_{АБ} = \frac{W_{АБ}}{q} = \frac{W_{АО}}{q} + \frac{W_{ОБ}}{q} = \frac{W_{АО}}{q} - \frac{W_{БО}}{q}.$$

или

$$U_{АБ} = \varphi_A - \varphi_Б.$$

Наконец, в последнем случае (рис. 1-2, *в*) потенциалы обеих точек *А* и *Б* являются отрицательными. Действительно,

$$\varphi_A = \frac{W_{AO}}{q} = -\frac{W_{OA}}{q} \text{ и } \varphi_Б = \frac{W_{БO}}{q} = -\frac{W_{БO}}{q}.$$

Так как по абсолютному значению $W_{AO} < W_{БO}$, то с учетом знаков и здесь получаем $\varphi_A > \varphi_Б$. Тогда напряжение между точками *А* и *Б*

$$\frac{W_{БA}}{q} = \frac{W_{БO}}{q} - \frac{W_{AO}}{q},$$

или

$$\frac{W_{AБ}}{q} = -\left(\frac{W_{БO}}{q} - \frac{W_{AO}}{q}\right)$$

и

$$U_{AБ} = \varphi_A - \varphi_Б.$$

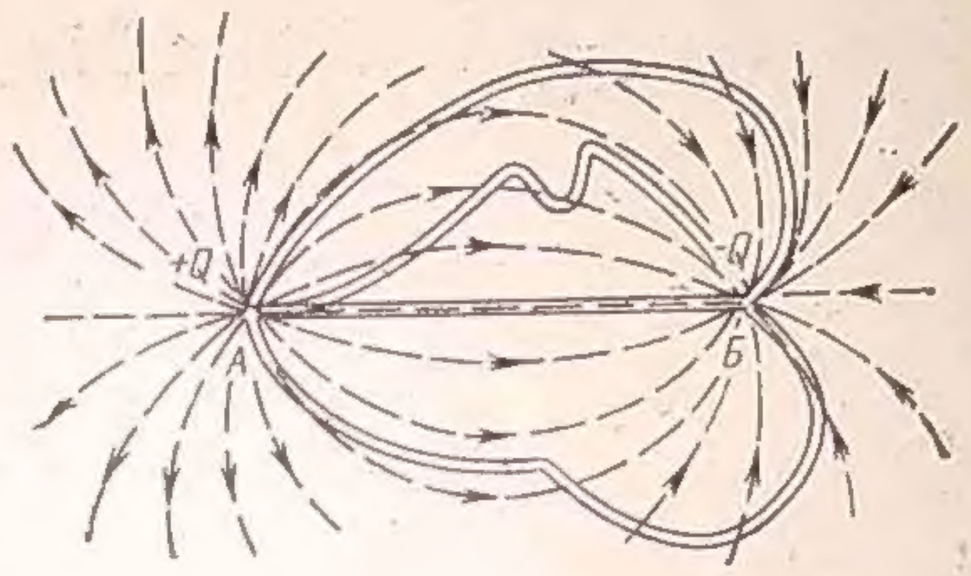


Рис. 1-3. К задачам 1-1, 1-5.

Вопросы и упражнения к задачам 1-1, 1-2**

1. Каков смысл положительной работы, отрицательной работы?

2. Как изменяются потенциалы точек в направлении линии электрического поля?

3. Потенциал одной точки электрического поля $\varphi_A = +15$ В, другой $\varphi_Б = -30$ В. В каком направлении может перемещаться под действием сил электрического поля пробный положительный заряд, отрицательный заряд?

4. Зависят ли значения потенциалов и напряжения между любой парой точек поля от выбора точки нулевого потенциала?

5. В электрическое поле помещены несколько тонких стеклянных трубок разной длины. Трубки изогнуты так, что одни концы их совмещаются в точке *А*, другие — в точке *Б*. Напряжение на концах самой короткой трубки составляет 10 В. Каким будет напряжение на концах другой трубки, имеющей самую большую длину (рис. 1-3)?

6. В электрическом поле при перемещении пробного заряда по пути *АБ* совершается работа $W_{AБ} = 3$ Дж. Чему будет равна работа по пути *БА* $W_{БA}$?

7. Напряжение между двумя точками электрического поля $U_{AБ} = 10$ В. Определить напряжение $U_{БA}$.

8. Потенциал одной точки электрического поля φ_A, другой точки — $\varphi_Б$. Определить напряжения $U_{AБ}$ и $U_{БA}$. Значения потенциалов $\varphi_Б$ и φ_A даны в следующей таблице:

φ_A, В	10	—10	10	—10
$\varphi_Б$, В	4	4	—4	—4

1-3. Работа сил электрического поля, производимая при перемещении положительного заряда $q = 0{,}02$ Кл между точками *А* и *Б*,

$W_{АБ}=0{,}6$ Дж. Определить напряжение между точками $А$ и $Б$ и потенциалы этих точек относительно условной точки нулевого потенциала 0, если: 1) работа сил электрического поля при перемещении того же заряда между точками $Б$ и $О$ $W_{БО}=0{,}2$ Дж (рис. 1-2, *а*); 2) работа сил электрического поля при перемещении того же заряда между точками $А$ и $О$ $W_{АО}=0{,}2$ Дж (рис. 1-2, *б*); 3) работа сил электрического поля при перемещении того же заряда между точками $О$ и $А$ $W_{ОА}=0{,}2$ Дж (рис. 1-2, *в*).

1-4. На линии электрического поля (стрелка указывает направление линии) заданы пять точек $А$, $Б$, $В$, $Г$, $Д$ (рис. 1-4). Работа сил

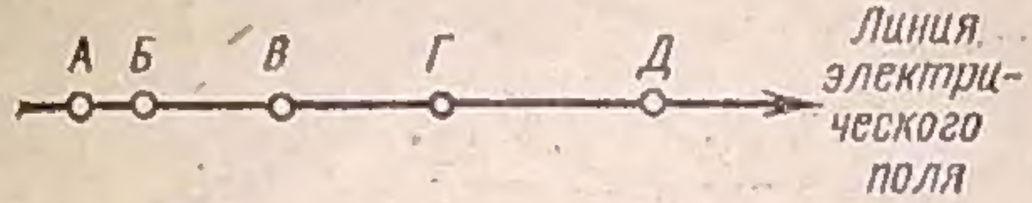


Рис. 1-4. К задаче 1-4.

электрического поля между любой парой смежных точек, совершаемая при перемещении положительного заряда $q=0{,}02$ Кл, всюду одинакова и составляет 0,2 Дж. Определить напряжение между точками $А$ и $Б$, $Б$ и $Г$, $Б$ и $Д$. Определить также потенциалы всех точек, поочередно принимая каждую из них за точку нулевого потенциала.

1-5*. Решить предыдущую задачу для однородного электрического поля, линия которого показана на рис. 1-5. Определить также силу, действующую на заряд q, и напряженность поля во всех рассматриваемых точках, если расстояние между любой парой смежных точек 5 см. Построить потенциальную диаграмму.

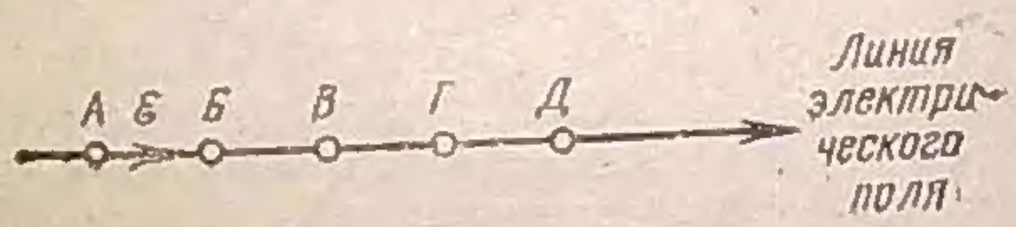


Рис. 1-5. К задаче 1-5.

Анализ и решение

Напряжение между любой парой точек определяется работой сил электрического поля на перемещение единицы положительного заряда из одной точки поля в другую, т. е. в общем случае

$$U=W/q.$$

Напряжение между точками $А$ и $Б$ $U_{АБ}=W_{АБ}/q$. Согласно условию $W_{АБ}=W_{БВ}=W_{ВГ}=W_{ГД}=0{,}2$ Дж. Следовательно, $U_{АБ}=0{,}2/0{,}02=10$ В. Напряжение между точками $Б$ и $Г$ выразится $U_{БГ}=W_{БГ}/q$. Работа, затрачиваемая на перемещение заряда из точки $Б$ в $Г$, равна сумме работ на пути из $Б$ в $В$ и из $В$ в $Г$. Поэтому

$$U_{БГ}=\frac{W_{БГ}}{q}=\frac{W_{БВ}}{q}+\frac{W_{ВГ}}{q}=\frac{0{,}2}{0{,}02}+\frac{0{,}2}{0{,}02}=20\text{ В}.$$

Аналогично напряжение между точками *Б* и *Д* выразится:

$$U_{БД}=\frac{W_{БД}}{q}=\frac{W_{БВ}}{q}+\frac{W_{ВГ}}{q}+\frac{W_{ГД}}{q}=30\ \text{В}.$$

Если за точку нулевого потенциала принять точку *А*, то потенциал точки *Б* выразится $\varphi_Б=W_{БА}/q$.

Работа $W_{БА}$ может быть осуществлена только под действием посторонних сил, так как она совершается по пути от *Б* к *А*, т. е. против сил электрического поля. Следовательно, работы $W_{БА}$ и $W_{АБ}$ равны по абсолютному значению, но имеют разные знаки. Поэтому $W_{БА}=-W_{АБ}$ и

$$\varphi_Б=\frac{W_{БА}}{q}=-\frac{W_{АБ}}{q}=-10\ \text{В}.$$

Аналогично определяются потенциалы всех остальных точек:

$$\varphi_Б=\frac{W_{ВА}}{q}=-\frac{W_{АВ}}{q}=-\left(\frac{W_{АБ}}{q}+\frac{W_{БВ}}{q}\right)=-20\ \text{В};$$

$$\varphi_Г=-30\ \text{В}\ \text{и}\ \varphi_Д=-40\ \text{В}.$$

Проверка решения может быть произведена, если ранее определенные напряжения выразить теперь как разности потенциалов. Например: $U_{БД}=\varphi_Б-\varphi_Д=(-10)-(-40)=30$ В.

Если за точку нулевого потенциала принять точку *Б*, то потенциалы остальных точек выразятся:

$$\varphi_А=\frac{W_{АБ}}{q}=10\ \text{В};\quad \varphi_В=\frac{W_{ВБ}}{q}=-\frac{W_{БВ}}{q}=-10\ \text{В};$$

$$\varphi_Г=\frac{W_{ГБ}}{q}=-20\ \text{В};\quad \varphi_Д=\frac{W_{ДБ}}{q}=-30\ \text{В}.$$

Напряжение между точками *Б* и *Д*

$$U_{БД}=\varphi_Б-\varphi_Д=0-(-30)=30\ \text{В}.$$

Рассуждая таким же образом в остальных случаях, получаем следующие значения потенциалов:

при $\varphi_В=0$ $\varphi_А=20$ В; $\varphi_Б=10$ В; $\varphi_Г=-10$ В; $\varphi_Д=-20$ В.

Напряжение между точками *Б* и *Д* (проверка):

$$U_{БД}=\varphi_Б-\varphi_Д=10-(-20)=30\ \text{В}.$$

При $\varphi_Г=0$ $\varphi_А=30$ В; $\varphi_Б=20$ В; $\varphi_В=10$ В; $\varphi_Д=-10$ В.

$$U_{БД}=\varphi_Б-\varphi_Д=20-(-10)=30\ \text{В}.$$

При $\varphi_Д=0$ $\varphi_А=40$ В; $\varphi_Б=30$ В; $\varphi_В=20$ В; $\varphi_Г=10$ В.

$$U_{БД}=\varphi_Б-\varphi_Д=30-0=30\ \text{В}.$$

В однородном поле $W = Fl$, где F — сила, действующая на заряд q; l — длина пути, по которому происходит перемещение заряда. Следовательно,

$$F = \frac{W_{АБ}}{l_{АБ}} = \frac{W_{БВ}}{l_{БВ}} = \ldots = \frac{0{,}2}{5 \cdot 10^{-2}} = 4 \text{ Н}.$$

Напряженность электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, выразится

$$\mathscr{E} = \frac{F}{q} = \frac{4}{0{,}02} = 200 \text{ В/м} = \text{const}.$$

Потенциальная диаграмма представлена на рис. 1-6.

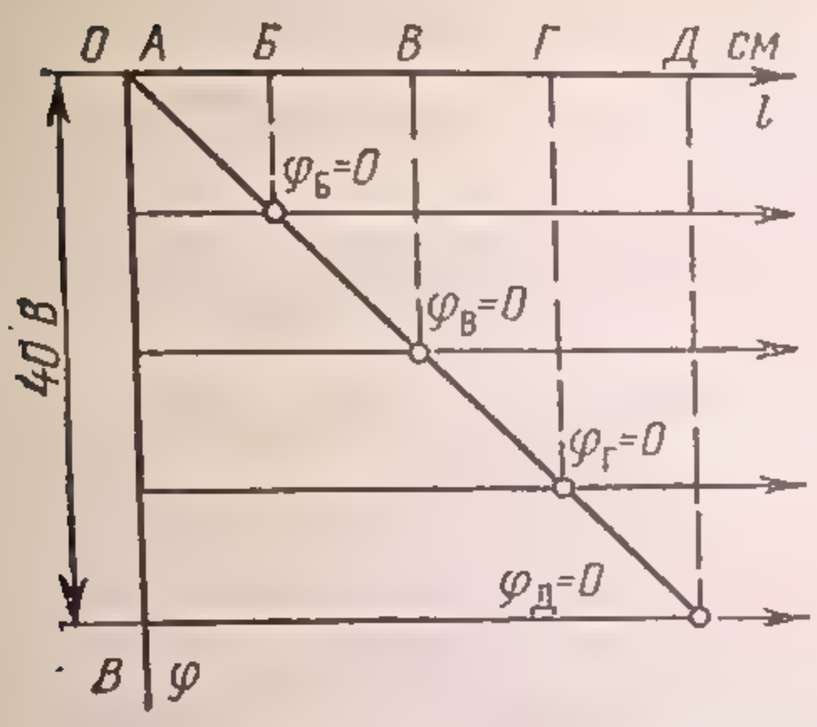


Рис. 1-6. К задаче 1-5.

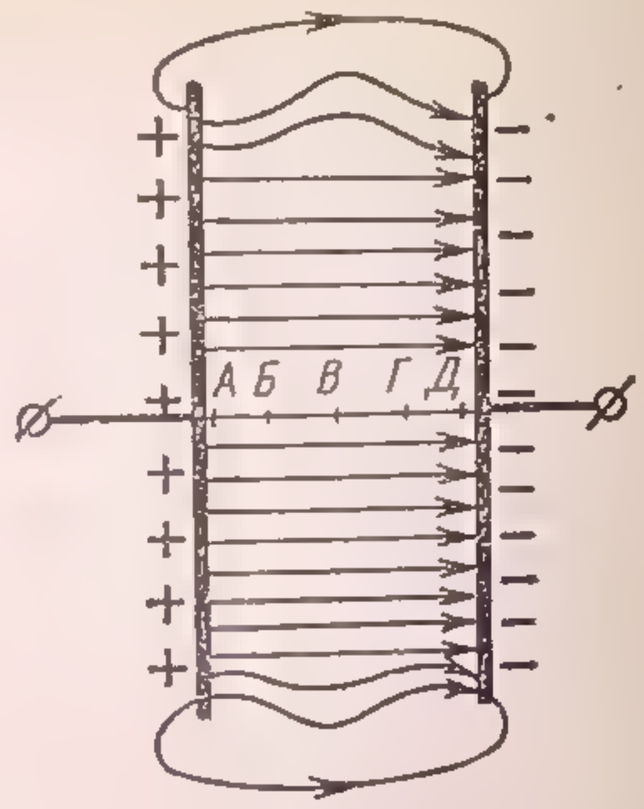


Рис. 1-7. К задаче 1-5.

*Вопросы и упражнения к задаче 1-5**

1. Примером неоднородного поля может служить поле точечного заряда (рис. 1-1) или поле двух точечных зарядов (рис. 1-3). Примером однородного поля может служить поле двух заряженных пластин (рис. 1-7).

Сопоставив условия задач 1-4 и 1-5, а также рис. 1-4 и 1-5, объяснить, почему линия электрического поля на рис. 1-4 характеризует неоднородное поле, а линия на рис. 1-5 — однородное поле.

2. Как изменится потенциальная диаграмма в зависимости от того, какой точке приписан нулевой потенциал?

3. Какими двумя величинами характеризуется электрическое поле в каждой его точке?

4. В некоторой точке электрического поля на заряд $q = 0{,}2$ Кл действует сила $F = 5$ Н. Определить напряженность поля в данной точке.

5. Определить напряжение между двумя точками однородного электрического поля, если напряженность поля $\mathscr{E} = 100$ В/м, а расстояние l вдоль линии поля, на которое перемещается положительный заряд, равно 10 см.

1-6. Однородное электрическое поле (рис. 1-7) характеризуется в некоторой точке напряженностью $\mathscr{E}$. На заряд q, помещенный в эту точку поля, действует сила F. При перемещении заряда q под

действием сил электрического поля по пути l совершается работа W. Напряжение между точками перемещения A и $Б$ $U_{АБ}$, потенциалы точек φ_A и $\varphi_Б$.

Все известные значения величин указаны в таблице. Определить значения, отмечены в таблице знаком «+».

Условие	F, Н	q, Кл	$\mathscr{E}$, В/м	W, Дж	l, м	$U_{АБ}$, В	φ_A, В	$\varphi_Б$, В
1	+	$4\cdot10^{-3}$	+	1,6	0,5	+	100	+
2	+	$3\cdot10^{-4}$	2000	+	0,25	+	−200	+
3	2,8	$3{,}5\cdot10^{-2}$	+	0,56	+	+	0	+
4	+	+	+	0,8	4	40	+	−10
5	0,4	+	5	+	+	+	−20	−120

1-7. Какие величины из требуемых в задаче 1-6 по имеющимся данным можно определить в общем случае для любого неоднородного поля?

1-8. В некоторой точке A электрическое поле характеризуется напряженностью $\mathscr{E}_A$. На заряд q, помещенный в эту точку поля, действует сила F_A.

Заданные значения величин указаны в таблице. Определить значения величин, отмеченных в таблице знаком «+».

Условия	F_A, Н	q, Кл	$\mathscr{E}_A$, 10^6 В/м
1	2,5	$0{,}5\cdot10^{-3}$	+
2	+	$7\cdot10^{-4}$	1,5
3	10	+	50

1-9*. Заряд $q=1{,}6\cdot10^{-8}$ Кл помещен в точку A поля точечного заряда (рис. 1-1), отстоящую от заряда $+Q$, создающего поле, на расстояние $R_1=10$ см. Под действием сил электрического поля заряд q перемещается по линии поля на расстояние $l_{АБ}=R_2-R_1=10$ см, $R_2=20$ см. При этом совершается работа $W=28{,}8\cdot10^{-6}$ Дж. Определить напряжение между точками A и $Б$, а также напряженности поля и силы, действующие на заряд q, в точках A и $Б$.

Анализ и решение

Напряжение между точками A и $Б$ определится работой сил электрического поля, отнесенной к единице заряда:

$$U_{АБ}=\frac{W_{АБ}}{q}=\frac{28{,}8\cdot10^{-6}}{1{,}6\cdot10^{-8}}=1800\text{ В}.$$

В неоднородном поле напряженность поля и сила, действующая на заряд q, не постоянны. Поэтому работа сил электрического поля на пути $l_{АБ}$ определится теперь как предел суммы работ на бесконечно малых участках dR, на которых сила не изменяется, т. е.

$$W_{АБ}=\int_{R_1}^{R_2}F\,dR.$$

Отнеся работу к единице заряда, получим:

$$U_{АБ} = \frac{W_{АБ}}{q} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{F}{q} dR = \int_{R_1}^{R_2} \mathcal{E} dR.$$

Из формулы закона Кулона для взаимодействующих точечных зарядов

$$F = \frac{Qq}{\varepsilon_a \cdot 4\pi R^2}$$

напряженность поля

$$\mathcal{E} = \frac{F}{q} = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi R^2}.$$

Здесь ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды. Будем считать, что средой, в которой образовано рассматриваемое поле, является воздух.

Для воздуха и вакуума абсолютная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon_{а.воздуха} = \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} = 8{,}84 \cdot 10^{12} \text{ Ф/м}.$$

Подставляя выражение для напряженности поля под знак интеграла и интегрируя, получаем:

$$U_{АБ} = \int_{R_1}^{R_2} \mathcal{E}\, dR = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi R^2} dR = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R^2} = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi} \left| -\frac{1}{R} \right|_{R_1}^{R_2}.$$

И окончательно

$$U_{АБ} = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi} \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}.$$

Подставляя значения известных величин, определяем заряд Q, создающий поле:

$$Q = \frac{\varepsilon_a \cdot 4\pi U_{АБ}}{R_2 - R_1} R_1 R_2 = \frac{10^{-9} \cdot 4\pi \cdot 1800}{36\pi \cdot 0{,}1} \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}2 = 0{,}4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}.$$

Теперь можно определить напряженности электрического поля:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi R_1^2} = \frac{0{,}4 \cdot 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36\pi} \cdot 4\pi \cdot 0{,}01} = 3{,}6 \cdot 10^4 \text{ В/м};$$

$$\mathcal{E}_2 = \frac{Q}{\varepsilon_a \cdot 4\pi R_2^2} = \frac{0{,}4 \cdot 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36\pi} \cdot 4\pi \cdot 0{,}04} = 0{,}9 \cdot 10^4 \text{ В/м}.$$

Силы, действующие на заряд q:

$$F_1 = \mathscr{E}_1 q = 3{,}6 \cdot 10^4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-8} = 5{,}76 \cdot 10^{-4} \text{ Н}.$$

$$F_2 = \mathscr{E}_2 q = 0{,}9 \cdot 10^4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-8} = 1{,}44 \cdot 10^{-4} \text{ Н}.$$

1-10. В электрическом поле точечного заряда точка A отстоит от него на расстоянии $R_1 = 0{,}25$ м, точка $Б$ — на расстоянии R_2. Напряженность поля в точке A $\mathscr{E}_1 = 5 \cdot 10^6$ В/м, в точке $Б$ $\mathscr{E}_2 = 1{,}25 \times 10^6$ В/м. Определить расстояние R_2 и напряжение $U_{AБ}$ между точками A и $Б$.

Указание. При определении расстояния R_2 нужно учесть, что в неоднородном поле точечного заряда напряженности обратно пропорциональны квадрату расстояния от заряда, создающего поле.

1-2. КОНДЕНСАТОРЫ, ИХ ЕМКОСТЬ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ

1-11*. Электрический заряд на обкладках плоского конденсатора с изоляцией из парафинированной бумаги $Q = 8{,}6 \cdot 10^{-6}$ Кл. Площадь каждой металлической обкладки $S = 500$ см². Напряжение, приложенное к конденсатору, $U = 500$ В. Определить напряженность поля конденсатора, емкость его, расстояние между обкладками и запас электрической прочности изоляции у данного конденсатора.

Анализ и решение

Электрической емкостью конденсатора C называется отношение его заряда к напряжению

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Единица емкости — фарада (Ф)

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}; \quad C = \frac{8{,}6 \cdot 10^{-6}}{500} = 0{,}0172 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Емкость зависит только от размеров площади обкладок конденсатора, расстояния между ними S и разделяющей их изоляционной среды.

Емкость плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = \varepsilon_a \frac{S}{d},$$

где ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость промежутка между обкладками (диэлектрика).

Поскольку электрическое поле между параллельными пластинами плоского конденсатора равномерное, то его напряженность $\mathscr{E} = U/d$, В/м.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость (Ф/м) $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$, где ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Значения ε для разных изоляционных материалов приведены в таблице приложения 2. Для парафинированной бумаги примем $\varepsilon = 3{,}5$.

Так как $U=Q/C$, где $C=\varepsilon_a S/d$, а $\mathscr{E}=U/d$, то напряженность электрического поля конденсатора будет:

$$\mathscr{E}=\frac{Q}{S\varepsilon_a}=\frac{Q}{S\varepsilon_0\varepsilon}=\frac{8{,}6\cdot10^{-6}}{500\cdot10^{-4}\cdot8{,}84\cdot10^{-12}\cdot3{,}5}=554\cdot10^4 \text{ В/м}.$$

Емкость конденсатора

$$C=\frac{Q}{U}=\frac{8{,}6\cdot10^{-6}}{500}\cdot10^6=0{,}0172 \text{ мкФ}.$$

Из выражения для напряженности электрического поля определим расстояние между обкладками конденсатора:

$$d=\frac{U}{\mathscr{E}}=\frac{500}{554\cdot10^4}=0{,}9\cdot10^{-4} \text{ м}=0{,}09 \text{ мм}.$$

Расстояние между обкладками может быть определено также из выражения для емкости плоского конденсатора $C=\varepsilon_0\varepsilon S/d$.

В таблице приложения 2 указано, что нижний предел пробивной напряженности поля для бумаги, пропитанной парафином (электрическая прочность изоляции), $\mathscr{E}_{\text{проб}}=20\cdot10^6$ В/м.

Следовательно, запас электрической прочности изоляции данного конденсатора

$$\frac{\mathscr{E}_{\text{проб}}}{\mathscr{E}}=\frac{20}{5{,}56}=3{,}6.$$

*Вопросы и упражнения к задаче 1-11**

1. Как изменятся емкость и заряд на обкладках конденсатора, если напряжение на его выводах а) увеличить втрое; б) уменьшить в 2 раза?

2. Как нужно изменить толщину изоляции плоского конденсатора, чтобы при данном напряжении запас электрической прочности увеличился в 2 раза? Как изменятся при этом заряд на обкладках конденсатора и его емкость?

3. Как нужно изменить площадь обкладок плоского конденсатора, а соответственно и поверхность прилегающего к его обкладкам изоляционного слоя, чтобы при данном заряде запас электрической прочности увеличился в 2 раза. Как изменятся при этом напряжение на обкладках конденсатора и его емкость?

1-12. Заряд на обкладках конденсатора $0{,}13\cdot10^{-4}$ Кл, емкость конденсатора 0,05 мкФ. Определить напряжение на выводах конденсатора.

1-13. Конденсатор емкостью 2 мкФ присоединен к сети с постоянным напряжением 240 В. Определить заряд на обкладках конденсатора.

1-14. Конденсатор присоединен к сети постоянного тока с напряжением 1000 В. При этом на обкладках конденсатора накопились заряды $0{,}25\cdot10^{-3}$ Кл. Определить емкость конденсатора.

1-15. Плоский конденсатор имеет площадь каждой обкладки $S=1250$ см^2 и расстояние между ними $d=3$ мм. Определить емкость конденсатора, если изоляцией между обкладками служит а) воздух; б) миканит.

1-16. Определить площадь каждой из обкладок плоского конденсатора со слюдяной изоляцией, имеющего емкость 0,04 мкФ и расстояние между обкладками 0,25 мм.

1-17. Две параллельные металлические пластины опущены в ванну. Расстояние между пластинами 5 мм. Определить напряжение между пластинами, при котором наступит пробой изоляции в двух случаях: 1) ванна пуста; 2) ванна наполнена минеральным маслом.

1-18. При испытании электрокартона на электрическую прочность образец изоляции поместили между плотно прилегающими к нему параллельными плоскими электродами. Расстояние между электродами 4 мм. Пробой изоляции наступил при напряжении 48 кВ. Определить электрическую прочность электрокартона.

1-19*. К двум последовательно соединенным плоским конденсаторам с емкостями $C_1=4$ мкФ и $C_2=12$ мкФ подвели напряжение U, что вызвало появление на обкладках конденсаторов одинаковых зарядов $Q=0{,}003$ Кл. Изоляция и площади обкладок обоих конденсаторов одинаковы. Расстояние между обкладками первого конденсатора $d_1=3$ мм. Определить напряжения на выводах обоих конденсаторов, общее подведенное напряжение, расстояние между обкладками второго конденсатора, емкость эквивалентного плоского конденсатора и расстояние между его обкладками, считая, что площадь его обкладок такая же, как у данных конденсаторов.

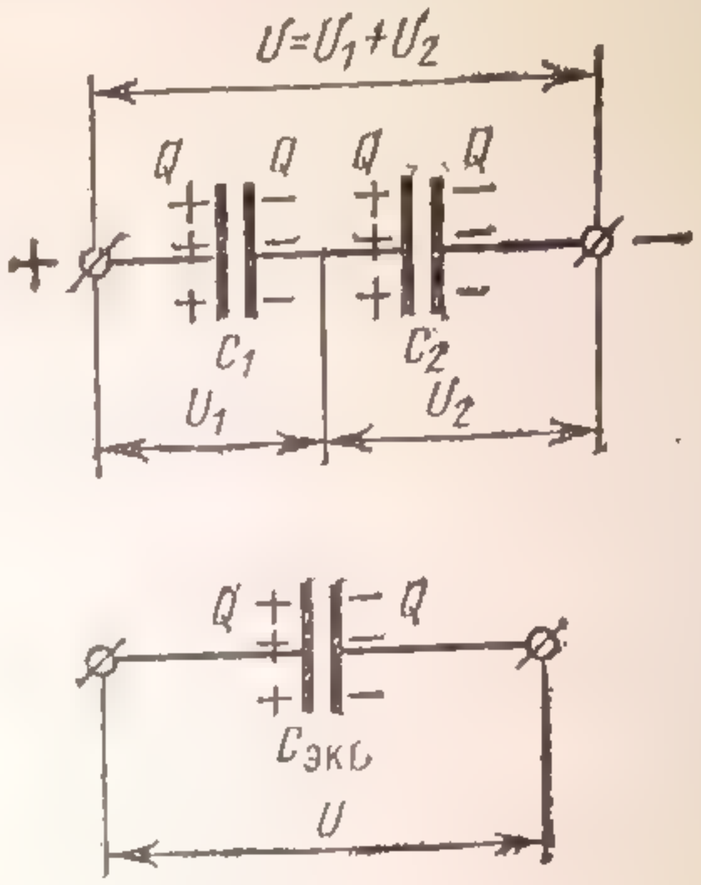


Рис. 1-8. К задаче 1-19.

Анализ и решение

При последовательном соединении конденсаторов на обкладках их устанавливается одинаковый заряд

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2.$$

Отсюда следует, что напряжения на конденсаторах будут:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{0{,}003}{4 \cdot 10^{-6}} = 750 \text{ В}; \qquad U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{0{,}003}{12 \cdot 10^{-6}} = 250 \text{ В}.$$

Общее подведенное напряжение $U = U_1 + U_2 = 750 + 250 = 1000$ В.

Эквивалентным конденсатором называется такой, который заменяет данные последовательно соединенные конденсаторы, т. е. при том же подведенном общем напряжении он получит такой же заряд, что и данные конденсаторы (рис. 1-8), т. е.

$$Q = C_{\text{экв}} U, \text{ откуда } C_{\text{экв}} = \frac{Q}{U} = \frac{0{,}003}{1000} \cdot 10^6 = 3 \text{ мкФ}.$$

Поскольку напряжение, подведенное к группе последовательно соединенных конденсаторов,

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n,$$

я из определения понятия электрическая емкость $U=Q/C$, то

$$\frac{Q}{C_{экв}}=\frac{Q}{C_1}+\frac{Q}{C_2}+\frac{Q}{C_3}+\ldots+\frac{Q}{C_n},$$

откуда

$$\frac{1}{C_{экв}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots+\frac{1}{C_n}.$$

В нашем примере

$$C_{экв}=\frac{C_1\cdot C_2}{C_1+C_2}=\frac{4\cdot 12}{4+12}=3 \text{ мкФ}.$$

Применительно к плоским конденсаторам последовательное соединение их при одинаковых изоляции и площади обкладок равносильно увеличению расстояния между обкладками, т. е. $d_{экв}=d_1+d_2$. Взяв отношение емкостей плоских конденсаторов, получим:

$$\frac{C_1}{C_2}=\frac{d_2}{d_1}, \text{ откуда } d_2=d_1\frac{C_1}{C_2}=3\frac{4}{12}=1 \text{ мм}$$

и

$$d_{экв}=d_1+d_2=3+1=4 \text{ мм}.$$

1-20*. К двум параллельно соединенным плоским конденсаторам с емкостями $C_1=4$ мкФ и $C_2=12$ мкФ подвели напряжение $U=1000$ В. Конденсаторы имеют одинаковые изоляцию и расстояние между обкладками. Площадь обкладки первого конденсатора $S_1=100$ см^2. Определить заряды на обкладках каждого конденсатора, общий заряд, подведенный к конденсаторам от источника питания, площадь обкладки второго конденсатора, емкость эквивалентного плоского конденсатора и площадь каждой из его обкладок, считая, что расстояние между ними такое же, как у данных конденсаторов.

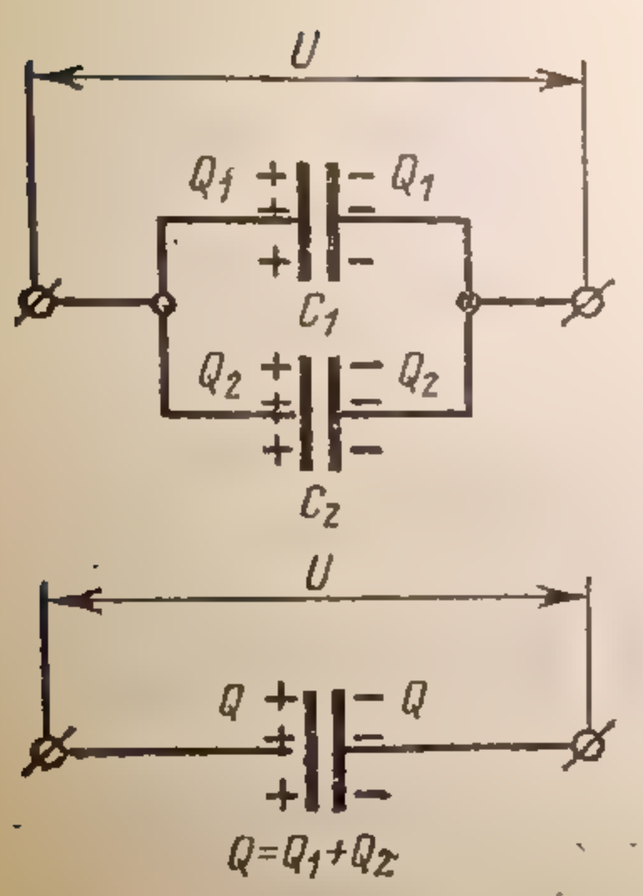


Рис. 1-9. К задаче 1-20.

Анализ и решение

При параллельном соединении конденсаторов к выводам их подведено одинаковое напряжение. Заряды на обкладках конденсаторов в общем случае будут разными:

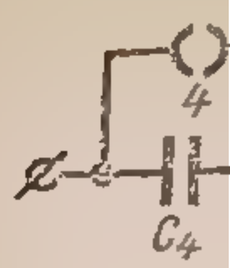
$$Q_1=C_1U=4\cdot 10^{-6}\cdot 10^3=4\cdot 10^{-3} \text{ Кл};$$

$$Q_2=C_2U=12\cdot 10^{-6}\cdot 10^3=12\cdot 10^{-3} \text{ Кл}.$$

Эквивалентным конденсатором называется такой, который заменяет данные параллельно соединенные конденсаторы, и при том же подведенном напряжении получит заряд Q, равный сумме зарядов данных конденсаторов (рис. 1-9), т. е. $Q=Q_1+Q_2=C_1U+C_2U=$

=(C₁+C₂) U=
=4·10⁻³+12·
Примените
нение их при
обкладками р
тельно, подста
костей плоских

Сокращая
емкостей плоск



C1

Рис. 1-10.

Отсюда

S

Вопросы и у

1. Как нужн
чтобы он мог за
единенных после
2. Как нужн
чтобы он мог за
единенных парал
3. Определит
ти конденсаторов
ном, а затем при
4. Батарея, с
под постоянное н
ляемых в гнезда,
денсаторов одина
тареи при вставле
2, 3; д) 1 и 2; е)

* Если параллел
... + C_n. При равны
$C_{экв}=nC$.

$=(C_1+C_2)\ U=C_{экв}U$, откуда $C_{экв}=C_1+C_2$*. Следовательно, $Q=4\cdot10^{-3}+12\cdot10^{-3}=16\cdot10^{-3}$ Кл и $C_{экв}=C_1+C_2=16$ мкФ.

Применительно к плоским конденсаторам параллельное соединение их при одинаковом материале изоляции и расстоянии между обкладками равносильно увеличению площади обкладок. Действительно, подставляя в уравнение $C_{экв}=C_1+C_2$ выражения для емкостей плоских конденсаторов, получаем:

$$\varepsilon_a\frac{S_1}{d}+\varepsilon_a\frac{S_2}{d}=\varepsilon_a\frac{S_{экв}}{d}.$$

Сокращая на ε_a/d, будем иметь $S_1+S_2=S_{экв}$. Взяв отношение емкостей плоских конденсаторов, получим

$$\frac{C_1}{C_2}=\frac{S_1}{S_2}.$$

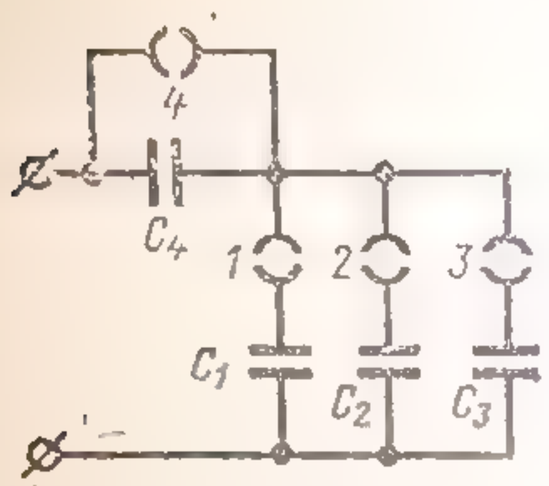


Рис. 1-10. К задаче 1-20.

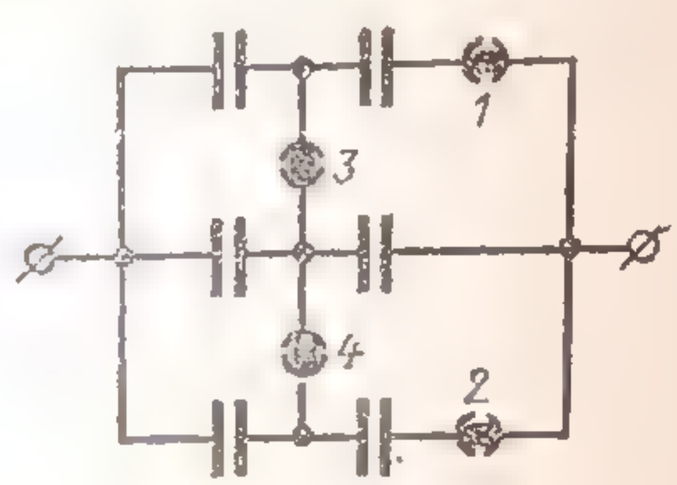


Рис. 1-11. К задаче 1-24.

Отсюда

$$S_2=S_1\frac{C_2}{C_1}=100\frac{12}{4}=300\ см^2;$$

$$S_{экв}=S_1+S_2=100+300=400\ см^2.$$

Вопросы и упражнения к задачам 1-19, 1-20**

1. Как нужно изменить размеры одного плоского конденсатора, чтобы он мог заменить по емкости два таких же конденсатора, соединенных последовательно.

2. Как нужно изменить размеры одного плоского конденсатора, чтобы он мог заменить по емкости два таких же конденсатора, соединенных параллельно.

* 3. Определить эквивалентную емкость батареи, собранной из пяти конденсаторов емкостью по 10 мкФ каждый, при последовательном, а затем при параллельном соединении конденсаторов.

4. Батарея, состоящая из четырех конденсаторов, включается под постоянное напряжение при помощи контактных штырей, вставляемых в гнезда, как показано на схеме рис. 1-10. Емкости всех конденсаторов одинаковы и равны по 6 мкФ. Определить емкость батареи при вставленных штырях: а) *1*; б) *4* и *1*; в) *4*, *1* и *2*; г) *4*, *1*, *2*, *3*; д) *1* и *2*; е) *1*, *2* и *3*.

* Если параллельно соединены n конденсаторов, то $C_{экв}=C_1+C_2+C_3+\ldots+C_n$. При равных емкостях параллельно соединенных конденсаторов $C_{экв}=nC$.

1-21. Два конденсатора с емкостями $C_1 = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ мкФ и $C_2 = 800$ пФ соединены последовательно. Определить эквивалентную емкость.

Примечание. 1 пикофарада (пФ) $= 10^{-6}$ микрофарад.

1-22. При последовательном соединении двух конденсаторов эквивалентная емкость равна 2,4 мкФ, при параллельном соединении 10 мкФ. Определить емкость каждого конденсатора.

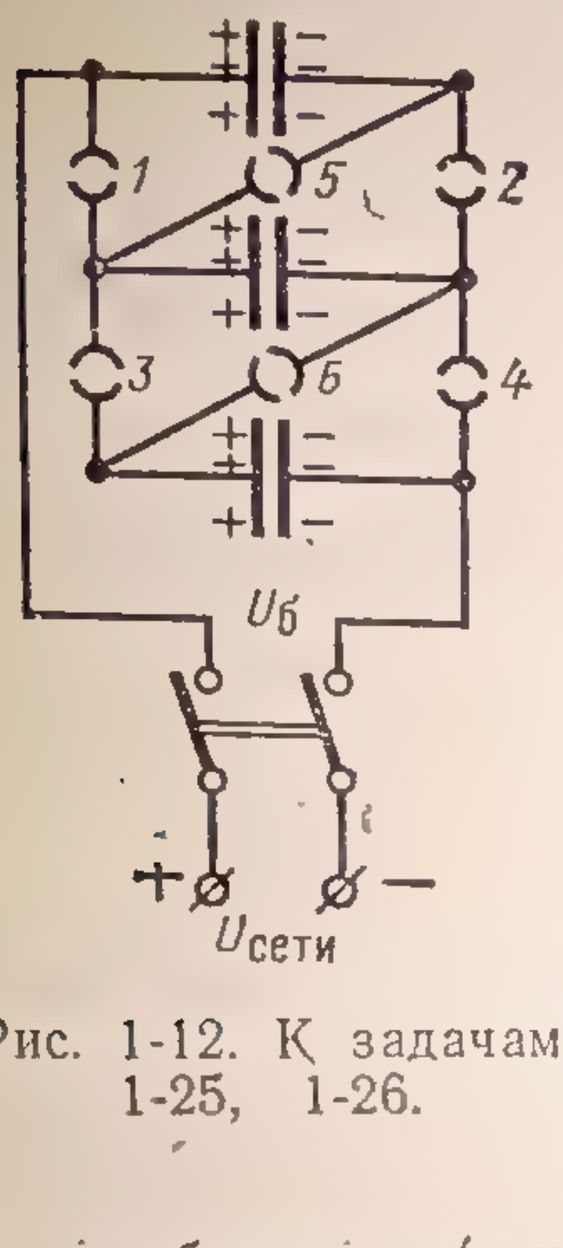


Рис. 1-12. К задачам 1-25, 1-26.

1-23. К трем последовательно соединенным конденсаторам с емкостями $C_1 = 200$ мкФ, $C_2 = 40$ мкФ и $C_3 = 100$ мкФ подведено напряжение $U = 1000$ В. Определить эквивалентную емкость, заряд и напряжение на каждом конденсаторе.

1-24. Шесть конденсаторов с емкостью по 6 мкФ каждый собраны в батарею, как показано на схеме рис. 1-11. Контактные гнезда отмечены цифрами. Сначала контактные штыри вставлены во все гнезда, а затем по порядку номеров последовательно вынимаются. Определить для каждой позиции эквивалентную емкость батарей.

1-25. Батарея конденсаторов с емкостью до 4 мкФ каждый с замкнутыми штырями *1—4* (рис. 1-12) включена на постоянное напряжение 250 В. Затем батарею отключили от сети, удалили штыри *1—4* и вставили в гнезда штыри *5*, *6*. Определить, каким теперь будет напряжение на выводах рубильника (отключенного от сети). Как изменится при этом энергия электрического поля батареи?[1]

1-26. Батарею из трех последовательно соединенных конденсаторов (замкнуты штыри *5* и *6*, рис. 1-12) зарядили от сети напряжением 240 В. Затем батарею отсоединили от сети и вставили сначала штырь *1*, затем *2*, затем *3* и, наконец, *4*. Как изменится при этом для каждой из указанных позиций напряжение на выводах отключенной от сети батареи, заряд и энергия электрического поля, если конденсаторы имеют одинаковую емкость, по 12 мкФ каждый?

1-27. У двух плоских конденсаторов одинаковых размеров различные диэлектрики: у одного воздух, у другого миканит ($\varepsilon = 5$). Емкость конденсатора с миканитовой изоляцией $C_2 = 2$ мкФ. К обкладкам конденсаторов подведен одинаковый заряд $Q = 4{,}4 \cdot 10^{-4}$ Кл. Определить напряжение и энергию электрического поля каждого из конденсаторов.

Определить емкость и напряжение эквивалентного конденсатора, у которого при этом же заряде запас энергии электрического поля был бы таким же, как у двух данных конденсаторов.

1-28. Расстояние между обкладками плоского конденсатора $d = 2$ мм, толщина изоляции из электроизоляционного картона $d_1 = 1{,}8$ мм ($\varepsilon = 6$). Таким образом, получится воздушный зазор тол-

---

[1] Энергия электрического поля определяется по формуле

$$W_{эл.поля} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}.$$

щиной $d_2=0{,}2$ мм (рис. 1-13). Определить напряжение и напряженность поля в каждом слое. Определить также, будет ли электрическая прочность изоляции в каждом слое достаточна, чтобы выдержать напряжение, приходящееся на этот слой. Напряжение, приложенное к обкладкам конденсатора, $U=1500$ В.

Указание. Два слоя изоляции в данном конденсаторе можно рассматривать как два последовательно соединенных конденсатора.

По формуле емкости плоского конденсатора $C=\varepsilon\varepsilon_0 S/d$ емкости слоев выразятся:

$$C_1=\frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 S}{1{,}8\cdot10^{-3}}=3{,}33\cdot10^3\,\varepsilon_0 S;\quad C_2=\frac{\varepsilon_2\varepsilon_0 S}{0{,}2\cdot10^{-3}}=5\cdot10^3\,\varepsilon_0 S.$$

Эквивалентная емкость конденсатора связана с емкостью последовательно соединенных конденсаторов уравнением

$$C_{\text{экв}}=\frac{C_1 C_2}{C_1+C_2}.$$

Подставляя выражения для C_1 и C_2, получаем $C_{\text{экв}}=2\varepsilon_0 S$. Заряд на обкладках последовательно соединенных конденсаторов и на обкладках эквивалентного конденсатора выразится

$$Q=C_1U_1=C_2U_2=C_{\text{экв}}U,$$

отсюда

$$U_1=\frac{C_{\text{экв}}}{C_1}U\ \text{ и }\ U_2=\frac{C_{\text{экв}}}{C_2}U.$$

Определив напряжения, можно далее определить напряженности поля в слоях

$$\mathscr{E}_1=\frac{U_1}{d_1}\ \text{ и }\ \mathscr{E}_2=\frac{U_2}{d_2}.$$

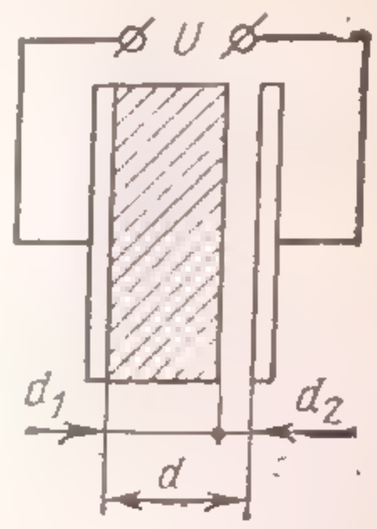


Рис. 1-13. К задаче 1-28.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2-1. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ НА ВЫВОДАХ ИСТОЧНИКА Э. Д. С. РАБОТА И МОЩНОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

2-1*. Для уяснения принципа работы источника э. д. с. на рис. 2-1 и 2-2 дана упрощенная схема генератора постоянного тока, на которой вся обмотка генератора сведена к одному условному проводнику с примыкающими к нему на концах направляющими (щетками). Вращательное движение обмотки в генераторе заменено поступательным движением проводника в равномерном магнитном по-

ле вдоль направляющих *А*, *Б* перпендикулярно плоскости чертежа с постоянной скоростью v_1 (рис. 2-1).

Условие 1. На каждый свободный электрон внутри движущегося проводника действует электромагнитная сила $F_0 = 0{,}8 \times 10^{-18}$ Н. Под действием ее электроны в металле начнут смещаться к одному (правому) концу провода, вследствие чего на противоположном конце образуется положительный заряд.

Одновременно с образованием на концах проводника разноименных зарядов возникает электрическое поле, которое действует на электроны с силой $F_{эл}$, направленной противоположно F_0. Сила $F_{эл}$ возрастает по мере накопления зарядов, и когда при разомкнутой внешней цепи силы электрического поля уравновесят электромагнитные силы, разделяющие заряды, накопление последних на концах проводника прекратится.

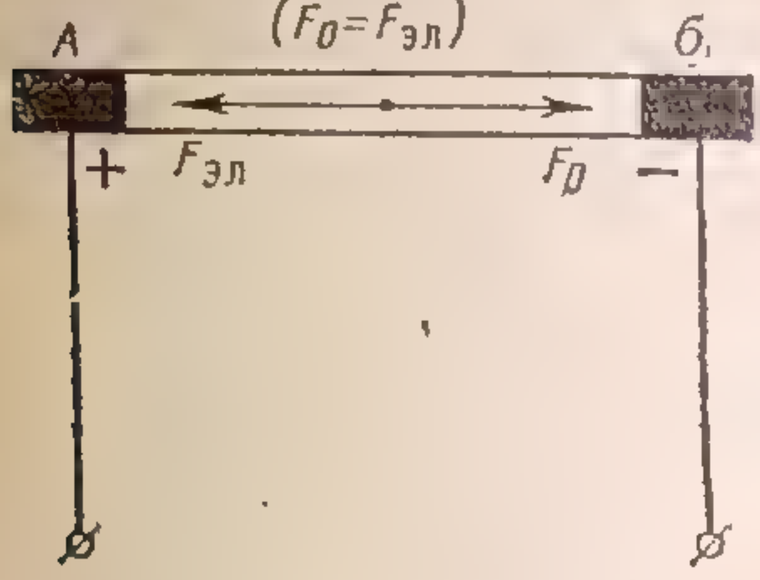


Рис. 2-1. К задаче 2-1; условие 1.

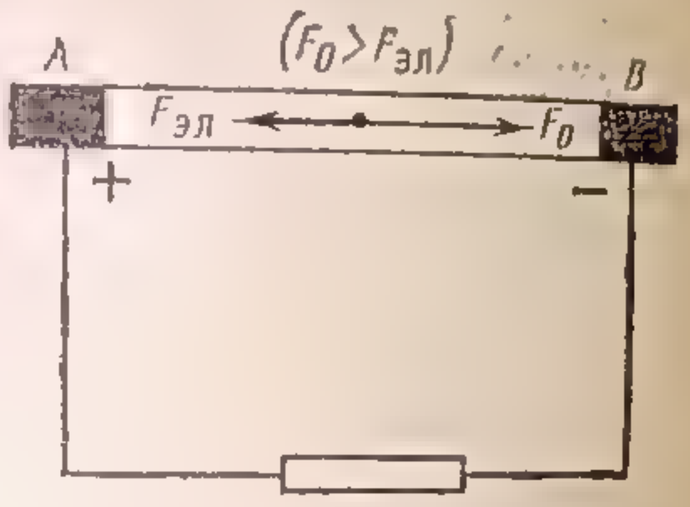


Рис. 2-2. К задаче 2-1; условие 2.

Определить э. д. с., наведенную в движущемся проводнике, и напряжение на его концах, если длина проводника $l = 1$ м. Заряд электрона $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Анализ и решение

Работа сил, разделяющих заряды, отнесенная к единице заряда, определяет э. д. с. источника:

$$E = \frac{W_{F_0}}{e_0} = \frac{F_0 l_{АБ}}{e_0} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-18} \cdot 1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 5 \text{ В}.$$

Здесь W_{F_0} — работа сил, разделяющих заряды, при переносе электрона внутри провода.

Напряжение на выводах источника, определяемое работой сил электрического поля, отнесенной к единице заряда, выразится:

$$U = \frac{W_{F_{эл}}}{e_0} = \frac{F_{эл} l_{АБ}}{e_0} = 5 \text{ В}.$$

При разомкнутой внешней цепи $F_0 = F_{эл}$ и напряжение на выводах источника равно его э. д. с.

Условие 2. При присоединении к выводам источника потребителя энергии (лампа, проволока нагревательного элемента) образуется замкнутая цепь (рис. 2-2).

При этом будем считать, что посторонний двигатель продолжает поддерживать движение проводника с прежней скоростью. Поэтому

сила, разделяющая заряды, F_0 остается неизменной. Теперь под действием электрического поля возникает движение электронов во внешней цепи от минуса источника э. д. с. к его плюсу, вследствие чего на выводах источника происходит частичная нейтрализация зарядов и нарушается равенство между силами, разделяющими заряды, и силами электрического поля. Последние уменьшаются, и движение электронов внутри источника э. д. с. будет продолжаться, но уже под действием преобладающих сил разделения зарядов. Таким образом, в замкнутой электрической цепи происходит непрерывное движение свободных электронов, поддерживаемое электромагнитными силами, разделяющими заряды внутри источника э. д. с., и силами электрического поля, действующими во внешней цепи, т. е. протекает электрический ток.

При протекании тока сила электрического поля, действующая на электрон, уменьшилась до величины $F'_{эл}=0{,}717\cdot10^{-18}$ Н. Число свободных электронов в единице объема движущегося проводника $n=125\cdot10^{20}$ электронов/см^3, средняя скорость их направленного движения (дрейфа) $v_{ср}=5$ мм/с, сечение проводника 0,2 мм^2.

Определить величину тока в цепи, плотность тока в движущемся проводнике, напряжение на зажимах источника э. д. с., падение напряжения внутри источника, составить уравнение энергетического баланса за время 10 с протекания тока и уравнение баланса мощностей. Определить электрический к. п. д. источника э. д. с.

Анализ и решение

Ток в цепи определяется количеством электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I=\frac{Q}{t}=ne_0Sv_{ср}=125\cdot10^{20}\cdot10^6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}2\cdot10^{-6}\cdot5\cdot10^{-3}=2\text{ А};$$

$$I=2\text{А}.$$

Плотность тока $\delta=\frac{I}{S}=\frac{2}{0{,}2}=10$ А/мм^2. Напряжение на выводах источника может быть определено отнесенной к единице заряда работой сил электрического поля во внешней цепи или внутри источника, так как работа не зависит от пути, по которому происходит перемещение зарядов (см. задачу 1-1). Следовательно,

$$U=\frac{W_{F_{эл}}}{e_0}=\frac{F'_{эл}\,l_{AB}}{e_0}=\frac{0{,}717\cdot10^{-18}\cdot1}{1{,}6\cdot10^{-9}}=4{,}5\text{ В}.$$

Падение напряжения внутри источника

$$U_0=E-U=5-4{,}5=0{,}5\text{ В}.$$

Для замкнутой электрической цепи работа сил, разделяющих заряды, при перемещении электрических зарядов внутри источника $W_{F_0}=EQ$, или, заменяя $Q=It$, получим: $W_{F_0}=EIt$. За время $t=10$ с $W_{F_0}=5\cdot2\cdot10=100$ Дж.

Эта работа совершается за счет энергии первичного двигателя, т. е. энергии, подводимой извне. По закону сохранения энергии полученная электрическая энергия источника э. д. с. превращается в

цепи в другие виды энергии. Работа электрических сил во внешней цепи: $W_{F_{эл}} = UQ$ или $W_{F_{эл}} = UIt$.

Для условия задачи $W_{F_{эл}} = 4{,}5 \cdot 2 \cdot 10 = 90$ Дж. Так как далее $U < E$, то $W_{F_{эл}} < W_{F_0}$ и, следовательно, не вся электрическая энергия генератора передается во внешнюю цепь, часть ее расходуется внутри источника э. д. с. (преобразуется в тепло).

Потеря энергии выразится:

$$W_0 = W_{F_0} - W_{F_{эл}} = (E - U)\,It = U_0\,It;$$

$$W_0 = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 10 = 10 \text{ Дж}.$$

Уравнение энергетического баланса получит вид:

$$W_{F_0} = W_{F_{эл}} + W_0, \text{ т.е. } 100 = 90 + 10.$$

Разделив обе части этого уравнения на время t, получим уравнение баланса мощностей

$$\frac{W_{F_0}}{t} = \frac{W_{F_{эл}}}{t} + \frac{W_0}{t} \text{ или } P_{ист} = P + P_0.$$

Мощность источника

$$P_{ист} = \frac{W_{F_0}}{t} = \frac{EIt}{t} = EI = 5 \cdot 2 = 10 \text{ Вт}.$$

Мощность потребителя

$$P = \frac{W_{F_{эл}}}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = 4{,}5 \cdot 2 = 9 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь внутри источника

$$P_0 = \frac{W_0}{t} = \frac{U_0\,It}{t} = U_0\,I = 0{,}5 \cdot 2 = 1 \text{ Вт}.$$

Электрический к. п. д. источника

$$\eta_э = \frac{W_{F_{эл}}}{W_{F_0}} = \frac{UIt}{EIt} = \frac{U}{E} = \frac{4{,}5}{5} = 0{,}9.$$

*Вопросы и упражнения к задаче 2-1**

1. Как направлена э. д. с. внутри движущегося проводника и ток в цепи (рис. 2-2)?

2. На рис. 2-3, *а* и *б* изображены схемы электрической цепи с генератором (рис. 2-3, *а*) и аккумуляторной батареей (рис. 2-3, *б*). Какими силами поддерживается электрический ток в замкнутой электрической цепи (во внешней цепи и внутри источника)?

3. В замкнутой электрической цепи падение напряжения внутри источника 4 В, э. д. с. источника 40 В. Определить показания вольтметра при замкнутой и разомкнутой электрической цепи (рис. 2-3).

4. Мощность источника э. д. с. 4 кВт, мощность, передаваемая потребителю, 3,8 кВт. Определить потери энергии внутри источника за 5 ч его работы.

5. Сколько дж
6. Сколько ва
1 Дж, 1 кДж?

2-2. В цепи, ченном рубильни В замкнутой цепи ставляет 3 А.

Условие развиваемую исто бителю, мощность ри источника э. д. трический к. п. д.

Условие процентное паден ния внутри исто U_0, выработанну скую энергию исто W_1 за время 20 W_2, отданную за во внешнюю це энергии внутри и

2-3. Для це э. д. с. источника ние напряжения в ника составляет Мощность, отдавае нюю цепь, 52,7 Вт

Определить то виваемую источни процентах мощно

2-2. ПРЕОБРАЗ В ТЕПЛОВУЮ.

2-4*. Для изго хромовый провод с лезного действия н за 1 кВт·ч. Опред вода нагревателя, и стоимость нагрев производиться в те 20, 30 мин. Напряж

Анализ и решен

Количество теп воды для нагрева разится:

$$W_{воды} = mc$$

Здесь c — удельная Учитывая к. п. д. на

$W_{нагрева}$

5. Сколько джоулей содержит 1 кВт·ч, 1 гВт·ч, 1 Вт·ч?
6. Сколько ватт-часов, гектоватт-часов, киловатт-часов содержит 1 Дж, 1 кДж?

2-2. В цепи, представленной на рис. 2-3, вольтметр при отключенном рубильнике показывает 12 В, при включенном — 10 В. В замкнутой цепи ток, определяемый по показанию амперметра, составляет 3 А.

Условие 1. Определить э. д. с. источника E, мощность P_1, развиваемую источником э. д. с.; мощность P_2, передаваемую потребителю, мощность потерь внутри источника э. д. с. P_0 и электрический к. п. д. источника $\eta_э$.

Условие 2. Определить процентное падение напряжения внутри источника э. д. с. U_0, выработанную электрическую энергию источника э. д. с. W_1 за время 20 мин; энергию W_2, отданную за то же время во внешнюю цепь, и потери энергии внутри источника W_0.

2-3. Для цепи рис. 2-3 э. д. с. источника 24 В. Падение напряжения внутри источника составляет 12% э. д. с. Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, 52,7 Вт.

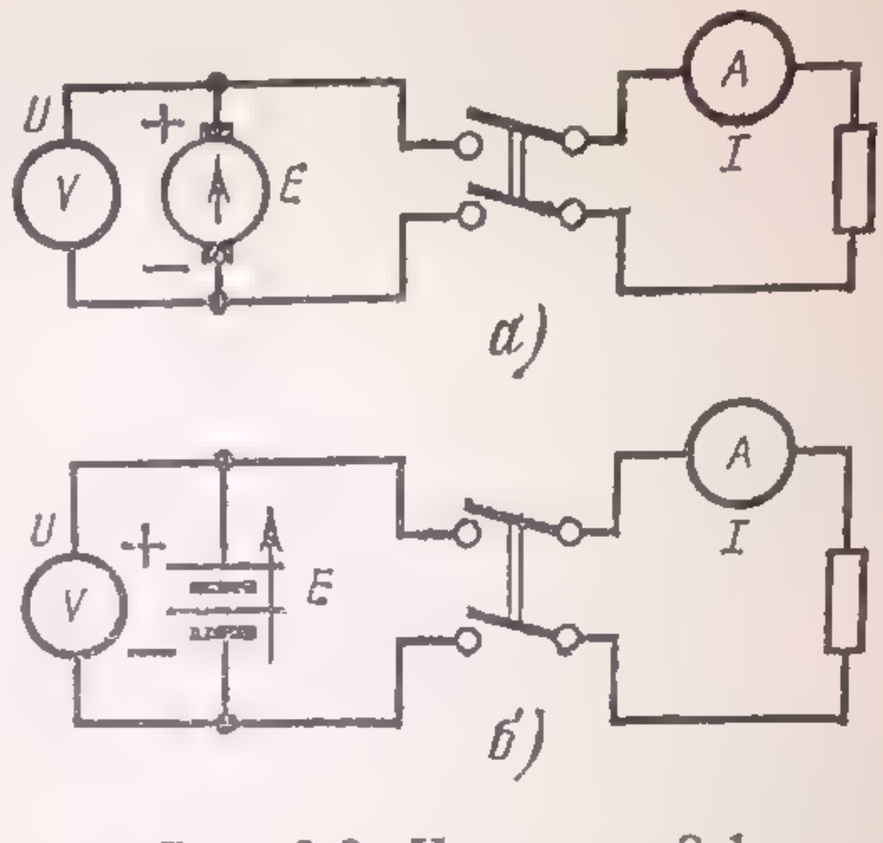


Рис. 2-3. К задаче 2-1.

Определить ток; напряжение во внешней цепи; мощность, развиваемую источником; мощность потерь внутри источника э. д. с. в процентах мощности источника и электрический к. п. д.

2-2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА. ЗАКОН ОМА

2-4*. Для изготовления нагревательного элемента имеется нихромовый провод с поперечным сечением 0,25 мм². Коэффициент полезного действия нагревателя 75%; тариф на электроэнергию 4 коп за 1 кВт·ч. Определить сопротивление и необходимую длину провода нагревателя, мощность, ток его, плотность тока, расход энергии и стоимость нагрева 4 л воды от 20 до 100°С, если нагрев должен производиться в течение времени t. Время принимать равным 5, 10, 20, 30 мин. Напряжение сети принять равным 220 В.

Анализ и решение

Количество теплоты, которое должно быть передано массе m воды для нагрева ее от температуры $\Theta_1 = 20°C$ до $\Theta_2 = 100°C$, выразится:

$$W_{\text{воды}} = mc(\Theta_2 - \Theta_1) = 4 \cdot 4170 \cdot 80 = 1\,335\,000 \text{ Дж}.$$

Здесь c — удельная теплоемкость воды, равная 4170 Дж/(кг·°С). Учитывая к. п. д. нагревателя, получаем:

$$W_{\text{нагревателя}} = \frac{W_{\text{воды}}}{\eta} = \frac{1335}{0{,}75} = 1\,780 \text{ кДж};$$

Электрическая энергия, преобразующаяся в тепло, определяется по закону Джоуля — Ленца

$$W_{F_{эл}} = UIt = I^2 rt, \qquad (1)$$

где r — электрическое сопротивление нагревателя.

Из уравнения (1) следует:

$I = \frac{W_{F_{эл}}}{Ut}$; учитывая, что $W_{F_{эл}} = W_{\text{нагревателя}}$, для времени нагрева $t = 5$ мин получаем: $I = \frac{1\,780\,000}{220 \cdot 5 \cdot 60} = 27{,}2$ А. Плотность тока

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{27{,}2}{0{,}25} = 109 \text{ А/мм}^2.$$

Теперь из того же выражения (1) определим сопротивление нагревателя:

$$r = \frac{W_{F_{эл}}}{I^2 t} = \frac{1780\,000}{735 \cdot 5 \cdot 60} = 8{,}1 \text{ Ом}.$$

Сопротивление r можно определить также из формулы закона Ома

$$I = \frac{U}{r}, \text{ откуда } r = \frac{U}{r} = \frac{220}{27{,}2} = 8{,}1 \text{ Ом}.$$

Сопротивление провода пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения $r = \rho l/S$. Удельное сопротивление нихрома $\rho = 0{,}98$ мкОм·м[1] (из таблицы приложения 3).

Следовательно, длина провода нагревательного элемента

$$l = \frac{rS}{\rho} = \frac{8{,}1 \cdot 0{,}25}{0{,}98} = 2{,}06 \text{ м}.$$

Мощность нагревателя $P = UI = I^2 r = 220 \cdot 8{,}1 = 1780$ Вт $= 1{,}78$ кВт.

Расход энергии на нагревание

$$W_{F_{эл}} = 1\,780\,000 \text{ Дж} = \frac{1\,780\,000}{3600 \cdot 1000} \approx 0{,}5 \text{ кВт·ч}.$$

Стоимость нагрева $C_т = W_{F_{эл}} T = 0{,}5 \cdot 4 = 2$ коп.

Для времени нагрева 10, 20, 30 мин расчет предоставляем сделать самим учащимся.

*Вопросы и упражнения к задаче 2-4**

1. Как изменится решение задачи 2-4*, если при том же времени нагрева напряжение сети взять в 2 раза меньшим?

2. Как изменятся ток, время нагрева, мощность, расход энергии, если нагревательный элемент задачи 2-4*, рассчитанный на напряжение 220 В, включить в сеть с напряжением 110 В.

3. Преобразование электрической энергии в тепловую происходит со скоростью 100 Дж/с при токе 2 А. Определить сопротивление цепи.

[1] Единица удельного сопротивления в системе СИ выразится мкОм·м $= 10^{-6}$ Ом·м $=$ Ом·мм²/м.

4. Сопротивле
Определить, с ка
вание электричес
5. К выводам
ствием которого
делится наибольш
а) $U = 100$
$r = 22$ Ом; г) $I =$
2-5. Определи
при длине 20 м
температуре 20°С
2-6. Из фехра
тать для нагревате
жении 120 В чере
ров проволоки до
сопротивления пр
2-7. Определи
вого изолированно
при присоединени
с напряжением 12
1,5 мм².
2-8. Медный
Определить сечени
алюминиевого про
2-9. Определи
путного электрифи
ли масса 1 м стал
стыковых соедине
рельсов, можно пр
Плотность и
как и для стальног
2-10. Определи
танных из провод
$w = 500$ витков. М
константан, третье
ческих размеров с
2-11. Определи
одинаковой длины
из разных материа

№ п/п.	
1	
2	М
3	Ал
4	Ст
	Во

Указание. И

[1] Плотности различ

4. Сопротивление внешней цепи $r=100$ Ом, ток в цепи $I=0{,}5$ А. Определить, с какой скоростью (Дж/с=Вт) происходит преобразование электрической энергии в теплоту?

5. К выводам резистора r приложено напряжение U, под действием которого протекает ток I. При каких данных в резисторе выделится наибольшее количество тепла в единицу времени?

а) $U=100$ В, $r=4$ Ом; б) $I=5$ А, $r=20$ Ом; в) $U=220$ В, $r=22$ Ом; г) $I=10$ А, $r=15$ Ом.

2-5. Определить, из какого материала сделана проволока, если при длине 20 м и диаметре 5,64 мм сопротивление проволоки при температуре 20°С равно 0,0229 Ом.

2-6. Из фехралевой проволоки диаметром 0,5 мм нужно намотать для нагревательного прибора такую спираль, чтобы при напряжении 120 В через нее проходил ток 2 А. Определить, сколько метров проволоки должно быть намотано, если пренебречь изменением сопротивления проволоки при нагреве?

2-7. Определить длину поступившего на склад мотка алюминиевого изолированного провода, не разматывая его, если известно, что при присоединении выведенных концов провода к источнику э. д. с. с напряжением 12 В по проводу проходит ток 8 А. Сечение провода 1,5 мм^2.

2-8. Медный провод длиной 220 м имеет сопротивление 0,35 Ом. Определить сечение и массу этого провода, а также сечение и массу алюминиевого провода той же длины и с тем же сопротивлением [1].

2-9. Определить сопротивление 1 км двух ниток рельсов однопутного электрифицированного железнодорожного участка пути, если масса 1 м стального рельса составляет 44,5 кг/м. Сопротивлением стыковых соединений и стальных поперечин, соединяющих нити рельсов, можно пренебречь.

Плотность и удельное сопротивление стали принять такими же, как и для стальной проволоки [1].

2-10. Определить сопротивление трех катушек при 20°С, намотанных из провода диаметром $d=0{,}4$ мм и имеющих каждая по $w=500$ витков. Материал провода одной катушки — медь, другой — константан, третьей — нихром. Все катушки одинаковых геометрических размеров со средним диаметром витка $D=51$ мм.

2-11. Определить, как должны относиться диаметры проводов одинаковой длины и равных сопротивлений, если провода выполнены из разных материалов. Решить в общем виде и для частных случаев:

№ п/п.	Материал проводов	
1	Медь	Манганин
2	Алюминий	Фехраль
3	Сталь	Нихром
4	Вольфрам	Константан

Указание. Из условия задачи следует, что

$$\rho_1 \frac{l}{\pi d_1^2/4} = \rho_2 \frac{l_2}{\pi d_2^2/4}.$$

[1] Плотности различных материалов приведены в таблице приложения 3.

Отсюда

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Для частных случаев значения удельного сопротивления приведены в таблице приложения 3.

2-12. Определить, как должны относиться длины проводов одинакового диаметра и равных сопротивлений, если провода выполнены из разных материалов. Решение дать в общем виде и для частных случаев, указанных в задаче 2-11.

2-13. Электрический нагревательный прибор емкостью 1,5 дм³ наполнен водой, которая нагревается от 20°С до кипения за 15 мин. Нагреватель работает при токе 6 А. Определить к. п. д. нагревательного прибора и сопротивление нагревателя для напряжений 120 и 220 В.

2-14. В резисторе $r=3$ Ом при прохождении неизменного тока в течение 40 мин выделяется 720 кДж теплоты. Определить напряжение на выводах резистора и протекающий по нему ток.

2-15. Через нить лампы мощностью 100 Вт проходит ток 0,79 А. Из всего количества энергии, потребляемой из сети лампой, 2% преобразуется в лучистую энергию; остальная часть преобразуется в тепло. Какое количество теплоты выделит лампа в течение двух часов горения и каково сопротивление нити лампы в накаленном состоянии?

2-3. НАГРЕВАНИЕ ПРОВОДОВ. ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ПО ТАБЛИЦАМ ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК И ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ. ВЫБОР ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

2-16*. Условие 1. В двухпроводную линию напряжением 220 В (рис. 2-4) включена электрическая печь мощностью 2,2 кВт. Нагревательный элемент печи выполнен из константановой проволоки диаметром $d_к=0{,}8$ мм. Питающая линия может быть выполнена двумя медными проводами (марки ПР) сечением 2,5 или 10 мм². Предельную допускаемую температуру нагрева для медных изолированных проводов принять равной 60°С при температуре окружающей среды 25°С и коэффициент теплоотдачи $K=30{,}7$ Вт/(м².°С). Рассчитать допустимую по условиям нагрева плотность тока и допустимый (номинальный) ток для медных изолированных проводов указанных сечений, выбрать сечение проводов для питающей линии и плавкие предохранители к ним.

Полученные в результате расчета значения номинального тока сравнить с номинальными токами для данных проводов, приведенными в таблице длительно допустимых нагрузок (приложение 4).

Определить также установившуюся температуру нагрева константанового нагревательного элемента печи, если коэффициент теплоотдачи его в 2,5 раза больше, чем для медных изолированных проводов, и температура окружающей среды 20°С.

Анализ и решение

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) определяют допустимую по условиям нагрева плотность тока, при которой данный

провод не перегревается выше допустимой температуры, которая для проводов с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией (ПР, ПВ) не должна превышать 60°С.

Количество ежесекундно выделяемого током в проводе тепла составляет $W/t = I^2r$, Дж/с.

Часть этого тепла идет на повышение температуры провода, а другая часть рассеивается в окружающую среду. С повышением температуры провода количество теплоты, рассеиваемой в окружающую среду, возрастает, а теплоты, идущей на нагрев, уменьшается. Когда последнее уменьшится до нуля, температура нагрева провода

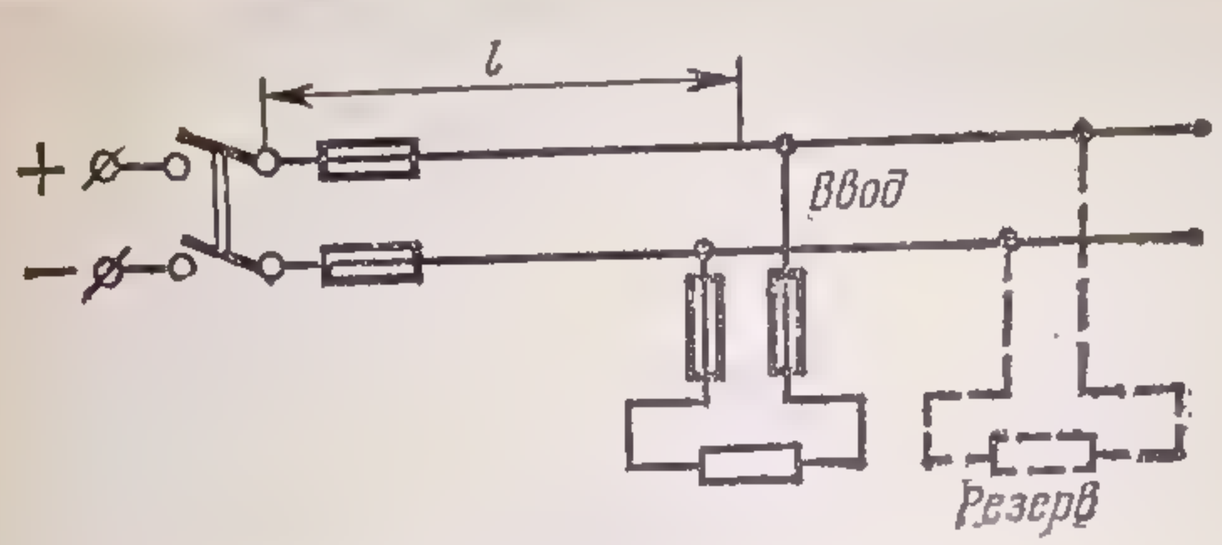


Рис. 2-4. К задаче 2-16; условие 1.

достигнет установившегося значения. При этом количество рассеиваемой ежесекундно теплоты станет равным количеству теплоты, выделяемой током, и уравнение теплового баланса получит вид:

$$I^2 r = KS_1 \Theta_{уст},$$

где K, Вт/(м²·°С) — коэффициент теплоотдачи, равный количеству теплоты, отводимой в 1 с с единицы поверхности провода при разности температур провода и окружающей среды в 1°С; S_1 — поверхность охлаждения провода, м²; $\Theta_{уст}$ — установившаяся разность температур провода и окружающей среды.

Плотность тока $\delta = I/S$, А/м²; сопротивление провода $r = l/\gamma S$, причем l — длина провода, м, $S = \pi d^2/4$, где d — диаметр провода, м.

С некоторым приближением можно считать, что поверхность охлаждения равна боковой поверхности цилиндрического провода, т. е. $S_1 = \pi dl$, где d выражено в метрах. Произведя соответствующую подстановку в уравнении теплового баланса, получим:

$$\delta^2 S^2 \frac{l}{\gamma S} = KS_1 \Theta_{уст},$$

или

$$\delta^2 \frac{\pi d^2 l}{4\gamma} = K\pi dl\Theta_{уст}.$$

Произведя в полученном уравнении сокращения, получим:

$$\frac{1}{4} \frac{\delta^2 d}{\gamma} = K\Theta_{уст}. \qquad (1)$$

Отсюда

$$\delta = \sqrt{\frac{K\Theta_{уст}\gamma \cdot 4}{d}}.$$

Допускаемая плотность тока $\delta_{доп}$ получается, если в выведенное выражение подставить $K=30{,}7$ Вт/(м^2·°С), $\Theta=60-25=35$°С, $d=1{,}8\cdot10^{-3}$ м, $\gamma_\theta=49\cdot10^6$ См/м. В таблице приложения 3 значения удельного сопротивления ρ и удельной проводимости γ приведены для разных проводниковых материалов при температуре 20°С. При нагревании удельное сопротивление проводника возрастает. Температурный коэффициент

$$\alpha=\frac{r_2-r_1}{r_1(\Theta_2-\Theta_1)}. \qquad (2)$$

Здесь r_1 — сопротивление проводника, соответствующее температуре Θ_1, °С; r_2 — сопротивление проводника, соответствующее температуре Θ_2, °С.

Таким образом, температурный коэффициент α показывает относительное изменение сопротивления проводника из данного материала при изменении температуры его на 1°С. Из формулы (2) следует, что $r_2=r_1[1+\alpha(\Theta_2-\Theta_1)]$.

При нагреве медного провода до 60°С его удельное сопротивление возрастет до значения $\rho_\Theta=\rho_{20}[1+\alpha(\Theta-20)]=0{,}0176[1+0{,}004\times\times40]=0{,}0204$ мкОм·м, удельная проводимость при этом получится равной $\gamma_\Theta=\dfrac{1}{0{,}0204}=49\cdot10^6$ См/м.

Диаметр проводов определим из формулы $S=\pi d^2/4$:

$$\text{для } S_1=2{,}5 \text{ мм}^2\ d_1=\sqrt{\frac{4S_1}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\cdot2{,}5\cdot10^{-6}}{\pi}}\approx$$

$$\approx1{,}8\cdot10^{-3} \text{ м}=1{,}8 \text{ мм};$$

$$\text{для } S_2=10 \text{ мм}^2\ d_2=\sqrt{\frac{4S_2}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\cdot10\cdot10^{-6}}{\pi}}=$$

$$=3{,}5\cdot10^{-3} \text{ м}=3{,}55 \text{ мм}.$$

Теперь для медных проводов сечением 2,5 мм^2

$$\delta_{доп}=\sqrt{\frac{30{,}7\cdot35\cdot49\cdot10^6\cdot4}{1{,}8\cdot10^{-3}}}\approx11\cdot10^6 \text{ А/м}^2\approx11 \text{ А/мм}^2.$$

Номинальный ток для медных проводов данного сечения

$$I_{ном}=\delta_{доп}S=11\cdot10^{-6}\cdot2{,}5\cdot10^6=27{,}4 \text{ А}.$$

В таблице приложения 4 для медного провода сечением 2,5 мм^2 проложенного открыто, указана длительно допустимая нагрузка (это то же, что и номинальный ток провода) 30 А, что почти совпадает со значением, полученным по расчету.

Если произвести аналогичный расчет для изолированного медного провода сечением 10 мм^2, то получится $\delta_{доп}=7{,}6$ А/мм^2, а $I_{ном}=76$ А.

Длительно
провода сечение
что также почти
Рабочий ток

Следователь
ми являются мед
тимым по услови
от той же сети е
ние проводов се
током 80 А эконо
являлось бы неоп

При возмож
при проектирова
расширения энер
$I_{ном.пров}\geqslant I$ и вы
это условие собл
провода сечением

При выборе
зоваться шкалой
(примечание к пр

Выбор плавк
ловия $I<I_{пл.вст.}$
с номинальным то

С учетом воз
установить четыре
идущих от источн
роприемнику (рис
браны по услови
Этому условию дл
ряют предохранит
вторые, исходя из
быть выбраны с но

Вместо плавки
лучили тепловые р
матическое отключе
ловых реле произво
предохранителей, но
после срабатывания
они могут быть повт

Установившееся
гревательного элемен
баланса

Определим значен
стантанового провода

$$S_к=\frac{\pi d_к^2}{4}=\frac{\pi}{}$$

Длительно допустимая нагрузка для изолированного медного провода сечением 10 мм² по таблице приложения 4 составляет 80 А, что также почти совпадает с данными расчета.

Рабочий ток в цепи

$$I = P/U = 2200/220 = 10 \text{ А}.$$

Следовательно, из имеющихся на складе проводов подходящими являются медные провода сечением 2,5 мм² для которых допустимым по условиям нагрева является ток 30 А, что позволяет питать от той же сети еще два таких же потребителя энергии. Использование проводов сечением 10 мм² с допустимым по условиям нагрева током 80 А экономически, с точки зрения расхода цветного металла, являлось бы неоправданным.

При возможности выбора проводов разных сечений, например, при проектировании сети, но без учета возможностей дальнейшего расширения энергоснабжения, следовало бы исходить из условия $I_{\text{ном.пров}} \geqslant I$ и выбрать наименьшее сечение провода, для которого это условие соблюдается. Тогда подходящими оказались бы медные провода сечением 0,5 мм², для которых $I_{\text{ном}} = 11$ А (приложение 4).

При выборе плавких вставок предохранителей следует воспользоваться шкалой номинальных токов стандартных плавких вставок (примечание к приложению 5).

Выбор плавких предохранителей следует производить из условия $I < I_{\text{пл.вст}}$. Этому условию удовлетворяют плавкие вставки с номинальным током 15 А.

С учетом возможностей расширения электроснабжения можно установить четыре плавких предохранителя: два в цепь проводов, идущих от источника питания, и два перед ответвлением к электроприемнику (рис. 2-4). В этом случае первые должны быть выбраны по условиям нагрева проводов, т. е. $I_{\text{ном.пров}} \geqslant I_{\text{пл.вст1}}$. Этому условию для медных проводов сечением 2,5 мм² удовлетворяют предохранители с номинальным током 25 А (30 А > 25 А); вторые, исходя из вышеприведенного условия $I < I_{\text{пл.вст2}}$, должны быть выбраны с номинальным током 15 А.

Вместо плавких предохранителей широкое распространение получили тепловые реле, которые при срабатывании вызывают автоматическое отключение выключателя. Выбор номинальных токов тепловых реле производится по тем же условиям, что и для плавких предохранителей, но преимущество тепловых реле состоит в том, что после срабатывания и устранения причины увеличения тока в цепи они могут быть повторно включены в цепь простым нажатием кнопки.

Установившееся превышение температуры константанового нагревательного элемента печи определим из уравнения (1) теплового баланса

$$\Theta_{\text{уст}} = \frac{1}{4} \frac{\delta_{\text{к}}^2 d_{\text{к}}}{\gamma_{\text{к}} K_{\text{к}}}.$$

Определим значения входящих в формулу величин. Сечение константанового провода

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0{,}8^2 \cdot 10^{-3 \cdot 2}}{4} = 0{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0{,}5 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в константановом проводе

$$\delta_к = \frac{I}{S_к} = \frac{10}{0{,}5 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^6 \text{ А/м} = 20 \text{ А/мм}^2.$$

Удельная проводимость для константана (приложение 3)

$$\gamma_к = 2 \cdot 10^6 \text{ См/м}.$$

Коэффициент теплоотдачи по условию задачи в 2,5 раза больше, чем для изолированных медных проводов, т. е.

$$K_к = 2{,}5 \cdot 30{,}7 = 79{,}5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Подставляя значения величин в формулу для $\Theta_{уст}$, получаем:

$$\Theta_{уст} = \frac{20^2 \cdot 10^{6 \cdot 2} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 79{,}5} = 500°C.$$

Температура нагрева константанового провода определится, если из превышения температуры $\Theta_{уст}$ вычесть температуру окружающей среды $\Theta_0 = 20°C$:

$$\Theta_{нагрева} = 500 - 20 = 480°C.$$

При определении $\Theta_{уст}$ значение удельной проводимости γ было взято из таблицы приложения 3. В этой таблице значения γ даны при 20°C. Там же приведены значения температурных коэффициентов для разных проводниковых материалов.

Температурный коэффициент константана $\alpha = 0{,}00004°C^{-1}$ весьма мал, и поэтому можно считать сопротивление константановой проволоки неизменным.

У с л о в и е 2. Произвести проверку сечения проводов, соединяющих электрическую печь с источником питания (рис. 2-5), по наибольшей допускаемой потере напряжения. Наибольшую допускаемую потерю напряжения в процентах номинального принять равной $\Delta U_{\%} = 2$, номинальное напряжение в сети $U_н = 220$ В. Расстояние от питающего пункта до электрической печи $l = 28{,}5$ м. Рассчитать каким должно быть сечение проводов при номинальном напряжении сети 120 В, если наибольшая допускаемая потеря напряжения в проводах и мощность печи останутся неизменными. Определить также для обоих случаев мощность потерь энергии в линии $\Delta P_{\%}$ в процентах номинальной мощности потребителя.

Анализ и решение

Напряжение в начале линии больше, чем в конце. Разность между этими напряжениями выражает потерю напряжения в проводах

$$\Delta U_{пр} = U_1 - U_2,$$

причем по закону Ома

$$\Delta U_{пр} = I r_{пр}.$$

Подставляя в последнее уравнение значение сопротивления $r_{пр} = 2l/\gamma S$, получаем: $\Delta U_{пр} = I \cdot 2l/\gamma S$, где I — ток в проводах сети, А; $2l$ — длина проводов сети в оба конца, м; γ — удельная проводимость проводов, См/м; S — сечение провода, м².

Каждый потребитель энергии рассчитан на так называемое номинальное напряжение, при котором он нормально работает.

Практически
телей, находящих
представляется в
номинальное напр
щих проводах буд
теля (I) и рассто
для каждого типа
или другую сторо
потерей напряжен

+∅

−∅

Р

Исходя из дан
передаваемой мощ
проводов, при кото
пустимой. Из выра

Если ΔU дано

$\Delta U = \frac{U_н \Delta U_{\%}}{100}$, то,

получаем:

или, умножая числит

Ввиду небольшо
определять из расче
пряжения электропри
Подставляя в по
вие 1), $2l = 2 \cdot 28{,}5$
$U_н = 220$ В, получаем
сети, выбранное при р
полученного по расче
каемой потери напряж
При номинальном
условиях сечение пров
больше. Это же следу
Отсюда можно сд
металла для сооружен
применять более высок

Практически источник энергии обслуживает несколько потребителей, находящихся от него на разных расстояниях. Поэтому не представляется возможным обеспечить для каждого потребителя номинальное напряжение, так как потеря напряжения в подводящих проводах будет изменяться в зависимости от нагрузки потребителя (I) и расстояния его от источника питания (l). Нормы ГОСТ для каждого типа потребителя допускают известные отклонения в ту или другую сторону от номинального напряжения, обусловленные потерей напряжения в проводах.

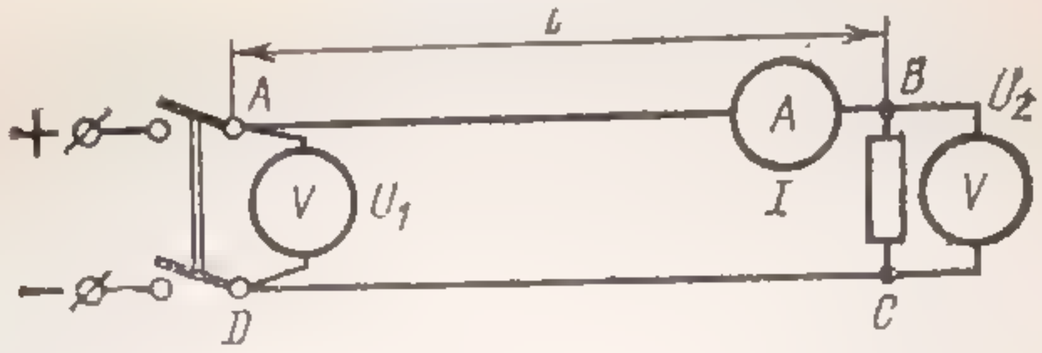


Рис. 2-5. К задаче 2-16; условие 2.

Исходя из данной допускаемой потери напряжения и тока или передаваемой мощности, можно определить минимальное сечение проводов, при котором потеря напряжения не будет превышать допустимой. Из выражения для ΔU следует, что сечение провода

$$S = I \cdot 2l/\gamma \Delta U.$$

Если ΔU дано в процентах $U_н$, т. е. $\Delta U_\% = \frac{\Delta U}{U_н} 100$, откуда $\Delta U = \frac{U_н \Delta U_\%}{100}$, то, подставляя в формулу для определения сечения, получаем:

$$S = \frac{I \cdot 2l \cdot 100}{\gamma U_н \Delta U_\%}, \qquad (3)$$

или, умножая числитель и знаменатель на $U_н$,

$$S = \frac{P_н \cdot 2l \cdot 100}{\gamma U_н^2 \Delta U_\%}. \qquad (4)$$

Ввиду небольшой потери напряжения ток в проводах I можно определять из расчета номинальной мощности и номинального напряжения электроприемника $I = P_н/U_н$.

Подставляя в полученное уравнение (4) $P_н = 2200$ Вт (условие 1), $2l = 2 \cdot 28{,}5 = 57$ м, $\gamma = 57 \cdot 10^6$ См/м (приложение 3), $U_н = 220$ В, получаем $S = 2{,}27 \cdot 10^{-6}$ м^2 $= 2{,}27$ мм^2. Сечение проводов сети, выбранное при решении задачи по условию 1 (2,5 мм^2), больше полученного по расчету, поэтому оно удовлетворяет условию допускаемой потери напряжения.

При номинальном напряжении сети $U'_н = 120$ В и прочих равных условиях сечение провода получится равным 7, 7 мм^2, т. е. в 3,4 раза больше. Это же следует непосредственно из выведенных формул.

Отсюда можно сделать вывод, что в целях экономии цветного металла для сооружения дальних линий электропередачи выгодно применять более высокие напряжения.

Если задан ток в линии, расчет сечения провода можно произвести по формуле (3).

При напряжении $U_н = 220$ В $I_н = \frac{P_н}{U_н} = \frac{2200}{220} = 10$ А.

При напряжении $U_н = 120$ В $I'_н = \frac{P'_н}{U'_н} = \frac{2200}{120} = 18{,}3$ А.

Подставив в формулу (3) значения токов, получим те же сечения проводов.

Мощность потерь энергии в линии в процентах номинальной мощности потребителя равна потере напряжения в проводах линии в процентах номинального напряжения, т. е. $\Delta P_{\%} = \Delta U_{\%}$.

Действительно,

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P_н} 100 = \frac{I_н^2 \cdot 2r_{пр}}{P_н} 100,$$

где $I_н$ — номинальный ток потребителя; $2r_{пр}$ — сопротивление обоих проводов линии;

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_н} 100 = \frac{I_н \cdot 2r_{пр}}{U_н} 100.$$

Умножив числитель и знаменатель выражения для $\Delta U_{\%}$ на $I_н$, получим:

$$\Delta U_{\%} = \frac{I_н^2 \cdot 2r_{пр}}{U_н I_н} 100 = \frac{\Delta P}{P_н} 100 = \Delta P_{\%}.$$

Следовательно, для обоих случаев $\Delta P_{\%} = 2$.

Вопросы и упражнения к задаче 2-16, условия 1 и 2*

1. Если в уравнение теплового баланса (1) подставить значения

$$\delta = \frac{1}{S} \text{ и } S = \frac{\pi d^2}{4},$$

то оно примет вид:

$$\frac{4}{\pi^2} \frac{I^2}{d^3 \gamma} = K\Theta_{уст} \cdot 1000. \quad (5)$$

Предполагая одинаковым и неизменным коэффициент теплоотдачи и пользуясь уравнением теплового баланса (1), определить:

а) какой из проводов одинакового диаметра и длины сильнее нагреется — медный или стальной и во сколько раз больше выделится теплоты при одинаковом токе в проводах?

б) какой из проводов одинаковой длины и из одного и того же материала, но разного диаметра сильнее нагреется и во сколько раз больше выделится теплоты при одинаковом токе в проводах, если $d_1 = 2 d_2$?

в) какой из проводов одинакового диаметра и из одного и того же материала, но разной длины сильнее нагреется и во сколько раз больше выделится теплоты при одинаковом токе в проводах, если $l_1 = 2 l_2$?

г) как изменится
если взять провод из
метра (допускаемая
ваться неизменной)?

д) как должен и
нии тока в 2 раза пр
остаться без изменен

е) как должны и
тимый ток провода пр

2. Определить из
вого провода в проце
шении или понижении

3. На сколько пр
готовленных из меди
тура их увеличится с

4. Как должно
энергии, если при ней
в 2 раза увеличить?

5. При допускаем
ходимое сечение пров
димое сечение проводо
уменьшить (увеличить

6. Как нужно буд
линии, если потеря на
да взять вдвое мен
а) неизменной переда
линии.

7. Как должно из
водов линии передачи
номинального напряже
медных проводов: а) а

Указание. При
уравнениями (3) и (4
вию 2.

8. Потеря напряже
противление одного пр
потерь в двухпроводно

Данны

2-17. Определить с
ного провода длиной 80
при 20 и 60°С.

2-18. Определить с
ний длиной 500 м, выпо
при температуре окружа

2-19. На сколько г
водник, чтобы сопротивл
для манганинового прово

2-20. Принимая уде
фициент ртути по табли

г) как изменится допустимый по условиям нагрева ток провода, если взять провод из того же материала, но вдвое большего диаметра (допускаемая температура нагрева провода должна оставаться неизменной)?

д) как должен измениться диаметр провода, если при увеличении тока в 2 раза предельная температура нагрева провода должна остаться без изменений?

е) как должны измениться допустимая плотность тока и допустимый ток провода при увеличении его диаметра?

2. Определить изменение сопротивления медного и константанового провода в процентах первоначального сопротивления при повышении или понижении температуры на 1°С.

3. На сколько процентов увеличится сопротивление обмоток, изготовленных из медного и константанового проводов, если температура их увеличится с 20 до 60°С?

4. Как должно измениться сечение проводов линии передачи энергии, если при неизменной мощности рабочее напряжение линии в 2 раза увеличить?

5. При допускаемой потере напряжения 2% минимально необходимое сечение проводов 0,5 мм². Каким будет минимально необходимое сечение проводов, если норму допускаемой потери напряжения уменьшить (увеличить) в 2 раза?

6. Как нужно будет изменить номинальное напряжение данной линии, если потеря напряжения должна остаться прежней, а провода взять вдвое меньшего сечения. Задачу решить для случаев: а) неизменной передаваемой мощности; б) неизменного тока в линии.

7. Как должно измениться требуемое наименьшее сечение проводов линии передачи при условии сохранения потери напряжения, номинального напряжения и нагрузки линии неизменными и замене медных проводов: а) алюминиевыми, б) стальными.

Указание. При решении примеров 4, 5, 6, 7 воспользоваться уравнениями (3) и (4), приведенными в решении задачи по условию 2.

8. Потеря напряжения в двухпроводной линии ΔU, ток I, сопротивление одного провода линии $r_{пр}$. При каких данных мощность потерь в двухпроводной линии будет наибольшей?

Данные: а) $r_{пр} = 2$ Ом, $I = 3$ А;

б) $\Delta U = 12$ В, $r_{пр} = 1{,}5$ Ом;

в) $r_{пр} = 4$ Ом, $I = 2$ А;

г) $\Delta U = 10$ В, $r_{пр} = 1$ Ом.

2-17. Определить сопротивление катушки, намотанной из медного провода длиной 80 м и площадью поперечного сечения 2,5 мм² при 20 и 60°С.

2-18. Определить сопротивление воздушной двухпроводной линии длиной 500 м, выполненной из медных проводов сечением 6 мм² при температуре окружающей среды 30; 0 и —20°С.

2-19. На сколько градусов нужно нагреть вольфрамовый проводник, чтобы сопротивление его возросло на 1%. Определить то же для манганинового проводника.

2-20. Принимая удельное сопротивление и температурный коэффициент ртути по таблице приложения 3, определить сопротивление

ртутного столба сечением 1 мм² и высотой 106,3 см при 20°С, а также температуру, при которой сопротивление данного столбика ртути будет равно 1 Ом.

2-21. Для определения температуры нагрева обмотки электродвигателя из медного провода измерили ее сопротивление, которое оказалось до начала работы 0,15 Ом (при температуре окружающей среды 20°С) и по окончании работы 0,17 Ом. Определить, до какой температуры нагрелась обмотка этого двигателя.

2-22. Определить относительное и абсолютное изменения сопротивления медных проводов, соединяющих электрическую печь с источником питания, и константановой проволоки нагревательного

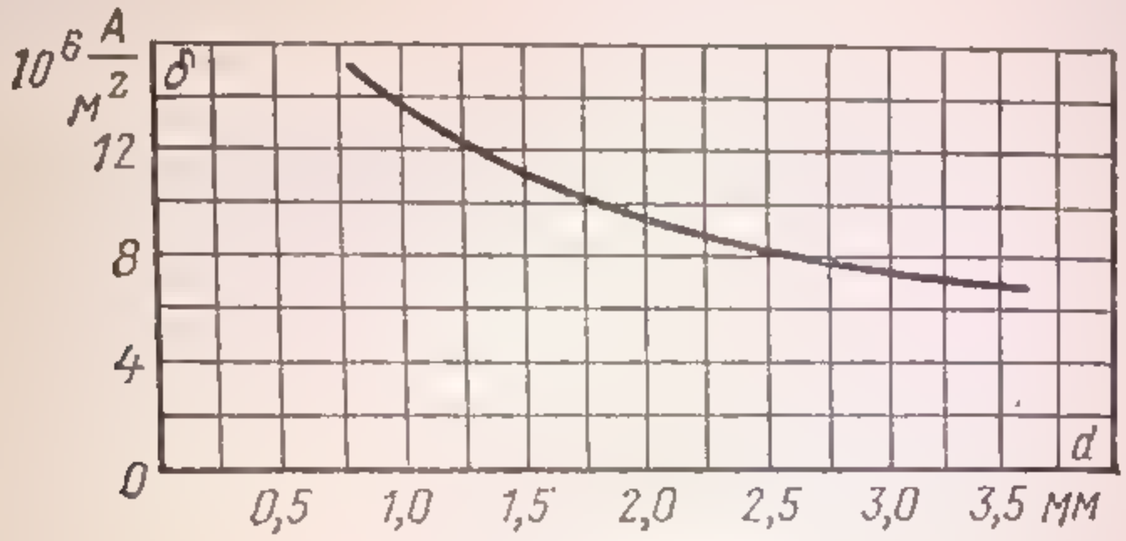


Рис. 2-6. К задаче 2-23.

элемента печи, если температура нагрева медных проводов достигнет $\Theta_{2м}=55°С$, а константановой проволоки $\Theta_{2к}=420°С$. Температуру окружающей среды принять равной 20°С.

Определить также сопротивление медных проводов $r_{2м}$ и константановой проволоки печи $r_{2к}$ после нагрева, если начальное сопротивление медных проводов $r_{1м}=0,4$ Ом, константановой проволоки $r_{1к}=24,2$ Ом.

2-23. На рис. 2-6 дана кривая допустимой по условиям нагрева плотности тока для медных изолированных проводов в функции диаметра провода. Пользуясь этой кривой, определить длительно допустимые нагрузки в амперах на провода сечением 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10 мм².

2-24. Для голого медного провода сечением 16 мм² (М-16) длительно допустимая нагрузка по условиям нагрева составляет 130 А. Рассчитать допустимый ток для алюминиевого провода того же сечения (А-16), считая температуру допустимого нагрева одинаковой для обоих проводов. Сверить полученный результат с данными таблицы приложения 5. Выбрать для защиты обоих типов проводов по условиям допустимого нагрева плавкие предохранители.

При решении задачи не учитывать изменение удельного сопротивления с изменением температуры. Коэффициент теплоотдачи считать в обоих случаях одинаковым и неизменным.

Указание. Следует воспользоваться уравнением теплового баланса (1), приведенным в решении задачи 2-16. Из этого уравнения получим $\delta^2 d/\gamma = K\Theta_{уст} \cdot 4$. Правая часть этого равенства в соответствии с условием задачи — величина постоянная. Следовательно, $\delta_1^2 d_1/\gamma_1 = \delta^2 d_2/\gamma_2$. Отсюда легко получить требуемый результат.

Условие выбора
дачи 2-16*, а выбор
жения 5.

2-25. Питающая
сти напряжением 22
рованных проводов.
потребителям, выпол
дов (рис. 2-7). Нагр
=5 кВт и $P_3=4$ кВт
щей линии. Выбрать
виям нагрева сечени
и номинальные ток
предохранителей дл
проводов питающей
ответвлений.

2-26. Из нихром
вода диаметром 0,1
изготовить нагревате
мент для электрическ
ника. Провод элемен
нагреваться до 418°С
пературе окружающ
18°С. Коэффициент
дачи принять равны
провода и мощность

Расчет паяльник

Указание. Д
нением теплового ба
условие 1. Из этого
ность тока δ, затем
вателя и длину прово

2-27. Электроприн
нальным напряжение
от распределительно
стоянии l. Допускае
превышать 5%.

Рассчитать по до
том нагрева необходи

Выбор сечения п
ных и алюминиевых
изоляцией, проложен

Определить факт
в процентах номина
потерь в линии $\Delta P_{\%}$
теля.

Варианты данных

	$P_н$, кВт	$U_н$, В
	10	
	15	
3*		220
		220

Условие выбора плавких предохранителей дано в решении задачи 2-16*, а выбор их производится согласно примечанию приложения 5.

2-25. Питающая двухпроводная линия небольшой протяженности напряжением 220 В должна быть выполнена из медных изолированных проводов. От линии должны отходить три ответвления к потребителям, выполненные также из медных изолированных проводов (рис. 2-7). Нагрузки ответвлений составляют $P_1=3$ кВт, $P_2=5$ кВт и $P_3=4$ кВт. Определить токи ответвлений, ток в питающей линии. Выбрать по условиям нагрева сечения проводов и номинальные токи плавких предохранителей для защиты проводов питающей линии и ответвлений.

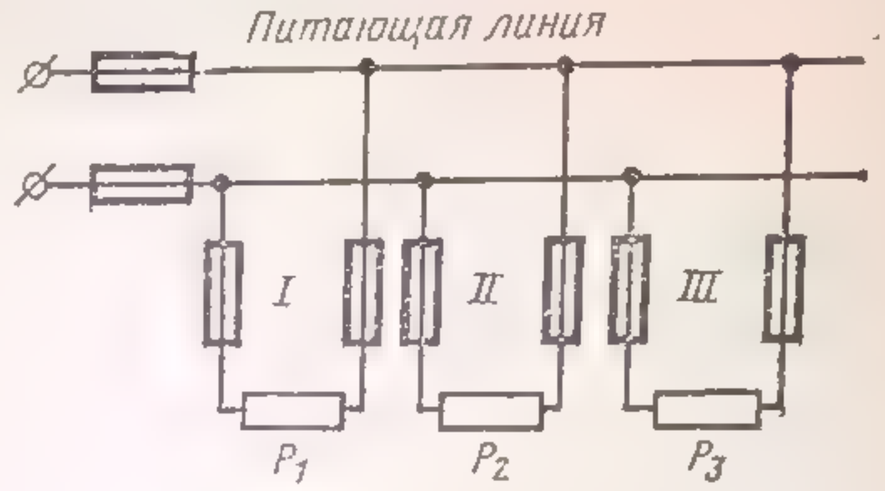


Рис. 2-7. К задаче 2-25.

2-26. Из нихромового провода диаметром 0,1 мм нужно изготовить нагревательный элемент для электрического паяльника. Провод элемента должен нагреваться до 418°С при температуре окружающей среды 18°С. Коэффициент теплоотдачи принять равным 75 Вт/(м^2·°С). Определить потребную длину провода и мощность нагревателя для паяльника.

Расчет паяльника произвести для напряжений 220 и 127 В.

Указание. Для решения задачи нужно воспользоваться уравнением теплового баланса (1), приведенным в решении задачи 2-16*, условие 1. Из этого уравнения нужно вывести и определить плотность тока δ, затем определить ток, мощность, сопротивление нагревателя и длину провода.

2-27. Электроприемник с номинальной мощностью $P_н$ и номинальным напряжением $U_н$ получает питание по двухпроводной линии от распределительного устройства, находящегося от него на расстоянии l. Допускаемая нормами потеря напряжения не должна превышать 5%.

Рассчитать по допускаемой потере напряжения и выбрать с учетом нагрева необходимое сечение проводов S.

Выбор сечения проводов с учетом нагрева произвести для медных и алюминиевых проводов с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией, проложенных открыто.

Определить фактическую потерю напряжения в вольтах ΔU и в процентах номинального напряжения $\Delta U_{\%}$, а также мощность потерь в линии $\Delta P_{\%}$ в процентах номинальной мощности потребителя.

Варианты данных приведены в таблице.

$P_н$, кВт	$U_н$, В	l, м	$P_н$, кВт	$U_н$, В	l, м
10	220	30	20	220	40
15	220	80	25	220	80

2-28. Определить минимальное сечение медных проводов, необходимых для сооружения двухпроводной линии длиной l, по которой передается мощность $P_н$ при номинальном напряжении $U_н$. Допускаемая нормами потеря напряжения не должна превышать 5%. Произвести проверку полученного сечения на нагрев для условий длительной нагрузки и голых проводов (таблица приложения 5). Варианты данных приведены в таблице.

$P_н$, кВт	100	50	25	20	10	5
$U_н$, В	500	3000	500	220	220	220
l, км	0,8	6	3	1	1,5	1,5

2-29. По двухпроводной линии из медных проводов (рис. 2-5) передается энергия на расстояние 250 м электроприемнику мощностью $P_2=20$ кВт при напряжении у потребителя $U_2=500$ В. Определить сечение проводов, напряжение в начале линии U_1, мощность потерь в проводах $\Delta P_{\%}$ в процентах мощности потребителя, к. п. д. передачи η, если потеря напряжения в проводах в процентах напряжения потребителя $\Delta U_{\%}=4{,}4\%$.

2-4. РАБОТА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА ЦЕПЬ С ПЕРЕМЕННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ. СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ). ЗАКОНЫ КИРХГОФА

2-30*. Генератор постоянного тока развивает э. д. с. $E=120$ В (рис. 2-8). Внутреннее сопротивление генератора r_0. К выводам генератора присоединен переменный резистор r, сопротивление которого можно изменять от ∞ (точка *х.х* на рис. 2-8 — холостой ход) до 0 (точка *к.з.* на рис. 2-8 — короткое замыкание). Построить внешние характеристики генератора для двух значений внутреннего сопротивления: $r_{01}=0{,}5$ Ом, $r_{02}=10$ Ом и определить токи короткого замыкания. Для указанных значений r_0 и при токе в цепи 8 А определить процентные изменения напряжения, соответствующие этому току, сопротивления внешней цепи, составить уравнение баланса мощностей и определить электрический к. п. д. генератора.

Анализ и решение

Внешней характеристикой генератора называется зависимость напряжения на его выводах от тока в цепи, изображаемая в виде графика $U=f(I)$.

Если из полной энергии, выработанной генератором, т. е. преобразованной из механической работы, вычесть энергию, переданную во внешнюю цепь, то получится энергия, расходуемая внутри генератора и преобразующаяся в тепло. Следовательно,

$$EIt - UIt = I^2 r_0 t.$$

Сокращая обе части равенства на It, получаем $E-U=Ir_0$, или

$$U = E - Ir_0. \qquad (1)$$

Заменяя далее

Таким образом
выводах генерато
напряжения $U_0=I$
изменении нагрузк
тока I, мы получа
тока [см. (1)].

Внешние хара
ставлены на рис. 2
чений r_0 можно пр

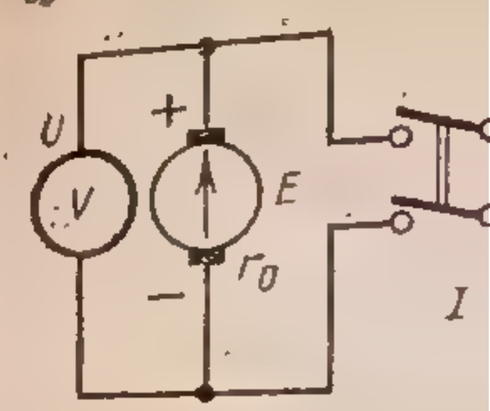


Рис. 2-8. К зад

двух произвольных
ном случае для зна
та) и $I_2=10$ А.

Как видно из
сопротивлением пр
жение мало изменя
тивлением, наоборо
изменение напряже
теристик при токе
процентах напряже
Напряжение на в
и $U_2=E-U_{02}=120$
сопротивления

$$r_1 = \frac{U_1}{I} =$$

В первом случае

При коротком з
тельно, и напряжен
$=E-I_{к.з}r_0=0$, отсю

Для генератора

Заменяя далее $U=Ir$, получаем выражение для тока

$$I=\frac{E}{r_0+r}. \qquad (2)$$

Таким образом, в замкнутой электрической цепи напряжение на выводах генератора меньше, чем э. д. с., на внутреннее падение напряжения $U_0=Ir_0$. Пренебрегая изменением э. д. с. генератора при изменении нагрузки, т. е. считая э. д. с. постоянной, не зависящей от тока I, мы получаем линейную зависимость напряжения в функции тока [см. (1)].

Внешние характеристики генератора для двух значений r_0 представлены на рис. 2-9. Построение характеристик для каждого из значений r_0 можно произвести по двум точкам (прямая линия), т. е. для

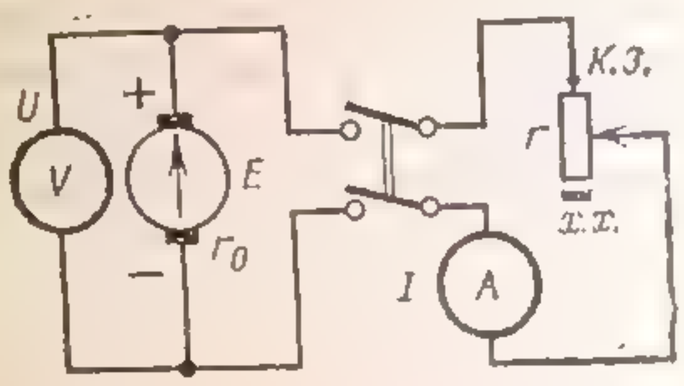


Рис. 2-8. К задаче 2-30.

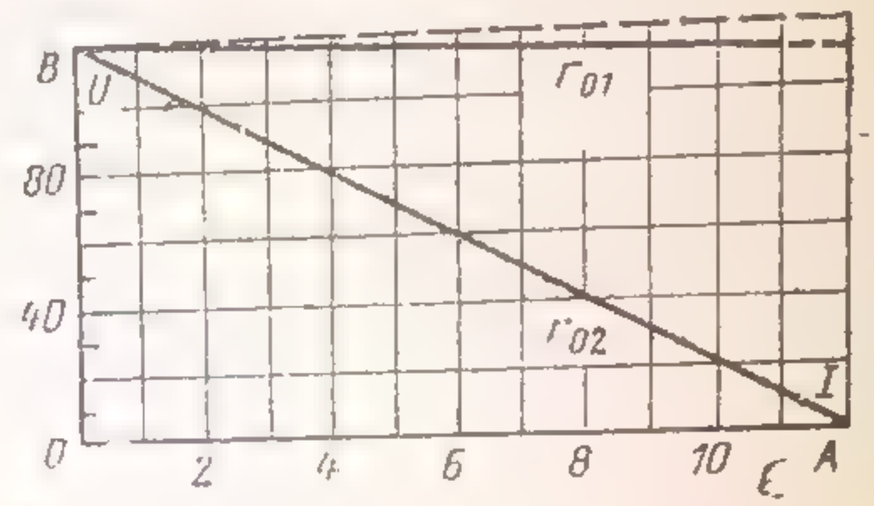


Рис. 2-9. К задаче 2-30.

двух произвольных значений тока, например, как это сделано в данном случае для значений тока $I_1=0$ (холостой ход — цепь разомкнута) и $I_2=10$ А.

Как видно из характеристик, у генератора с малым внутренним сопротивлением при изменении нагрузки в широких пределах напряжение мало изменяется. У генератора с большим внутренним сопротивлением, наоборот, при тех же условиях имеет место резкое изменение напряжения. Изменения напряжения по графикам характеристик при токе $I=8$ А получаются: $\Delta U_{01}=4$ В и $\Delta U_{02}=80$ В, а в процентах напряжения холостого хода соответственно 3,33 и 66,6%. Напряжение на выводах генератора $U_1=E-U_{01}=120-4=116$ В и $U_2=E-U_{02}=120-80=40$ В. Соответствующие току 8 А внешние сопротивления

$$r_1=\frac{U_1}{I}=\frac{116}{8}=14{,}5 \text{ Ом и } r_2=\frac{U_2}{I}=\frac{40}{8}=5 \text{ Ом}.$$

В первом случае $\frac{r_{01}}{r_1}=\frac{0{,}5}{14{,}5}=0{,}0347$, во втором $r_{02}/r=2$.

При коротком замыкании внешнее сопротивление r, а следовательно, и напряжение $U=I_{к.з}r$ должны быть равны нулю, т. е. $U=E-I_{к.з}r_0=0$, отсюда

$$I_{к.з}=\frac{E}{r_0}.$$

Для генератора с внутренним сопротивлением $r_{01}=0{,}5$ Ом

$$I_{1к.з}=\frac{120}{0{,}5}=240 \text{ А}.$$

Для генератора с внутренним сопротивлением $r_{02}=10$ Ом

$$I_{2к.з}=\frac{120}{10}=12\text{ А}.$$

Те же результаты можно получить и графически, если продолжить линию внешних характеристик до пересечения с осью абсцисс. Отсекаемые на этой оси отрезки покажут значения токов короткого замыкания для обоих генераторов.

Источники питания с ничтожно малым внутренним сопротивлением принято называть источниками э. д. с. (генераторы, аккумуляторы). Для них в широких пределах изменения внешнего сопротивления, а следовательно, и тока при $r_0 \ll r$ напряжение изменяется незначительно. Короткое замыкание для таких источников вызывает многократное увеличение тока и создает аварийный режим, при котором источник э. д. с. может быть поврежден.

Источники питания с очень большим внутренним сопротивлением (электронные генераторные лампы) принято называть источниками тока. Для них в широких пределах изменения внешнего сопротивления при $r_0 \gg r$ ток изменяется незначительно и практически равен току короткого замыкания $I_{к.з}=E/r_0$. Из уравнения (1) следует, что $E=U+Ir_0$. Умножая обе части этого уравнения на I, получаем уравнения баланса мощностей: $EI=UI+I^2r_0$ или $P_1=P_2+P_0$, т. е. мощность источника э. д. с. P_1 равна сумме мощностей потребителя (электроприемника) P_2 и мощности потерь внутри источника P_0. Электрический к. п. д. в процентах равен

$$\eta_{\%}=\frac{P_2}{P_1}\cdot 100=\frac{UI}{EI}\cdot 100=\frac{U}{E}100=\frac{E-Ir_0}{E}100=\left(1-\frac{U_0}{E}\right)100.$$

При $r_0=0{,}5$ Ом $P_1=EI=120\cdot 8=960$ Вт;

$P_2=UI=I^2r=116\cdot 8=928$ Вт; $P_0=I^2r=8^2\cdot 0{,}5=32$ Вт;

$$\eta_{\%}=\frac{P_2}{P_1}\cdot 100=\frac{928}{960}\cdot 100=96{,}7\%,$$

или $\eta_{\%}=\left(1-\frac{U_0}{E}\right)100=100-3{,}33\approx 96{,}7\%$; где $\frac{U_0}{E}100$ — найденное ранее по характеристикам изменение напряжения в процентах напряжения холостого хода.

Расчет при $r_0=10$ Ом дает следующие результаты: $P_1=960$ Вт; $P_2=320$ Вт; $P_0=640$ Вт; $\eta=33{,}4\%$.

*Вопросы и упражнения к задаче 2-30**

1. Чему равно внешнее сопротивление цепи при холостом ходе и коротком замыкании?

2. В каких пределах и как будет изменяться напряжение на выводах цепи при постоянной э. д. с. источника $E=50$ В и при изменении внешнего сопротивления от режима короткого замыкания до холостого хода?

3. В каких пределах и как будет изменяться ток в цепи при постоянной э. д. с. источника $E=100$ В и при изменении внешнего сопротивления от режима короткого замыкания до холостого хода, если внутреннее сопротивление источника: а) $r_{01}=0{,}2$ Ом; б) $r_{02}=10$ кОм.

4. В каких
ника э. д. с. пр
роткого замыка
и внутреннем со

2-31. Внутр
$r_0=0{,}1$ Ом, сопр
ток во внешней
дах $U=119$ В.

Определить
выводы источни
шого сечения, со

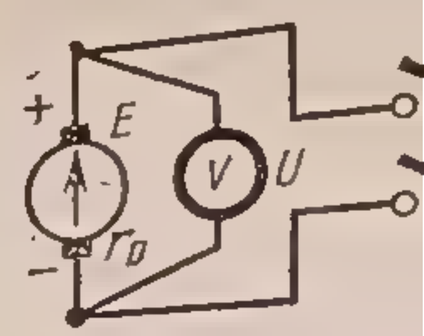


Рис. 2-10. К зад

2-32. При
э. д. с. 1,2 В ток
ней цепи можно

2-33. Падени
э. д. с. источника
лить напряжение
противление исто

2-34. Исполь
чески изменения
передаваемой во
ка U и электрич
сопротивления r.
ния переменного
Определить по г
место максимум
к. п. д.

2-35. Генерат
0,5 Ом (рис. 2-10)
Определить
его выводах. Сост

2-36. Мощнос
ляет 25 Вт, его в
пряжение и э. д.
12 Ом.

2-37. Электри
ра постоянного т
нератор развивает
тора 0,6 Ом. Врем
роэнергию 4 коп/(к
У с л о в и е 1.
печью ежесекундно

4. В каких пределах и как будет изменяться мощность источника э. д. с. при изменении внешнего сопротивления от режима короткого замыкания до холостого хода при э. д. с. источника $E=50$ В и внутреннем сопротивлении его $r_0=0{,}1$ Ом.

2-31. Внутреннее сопротивление источника э. д. с. (рис. 2-10) $r_0=0{,}1$ Ом, сопротивление внешней цепи $r=11{,}9$ Ом. Определить ток во внешней цепи и э. д. с. источника, если напряжение на выводах $U=119$ В.

Определить также ток в цепи и напряжение на выводах, если выводы источника э. д. с. замкнуты накоротко проводником большого сечения, сопротивление которого можно принять равным нулю.

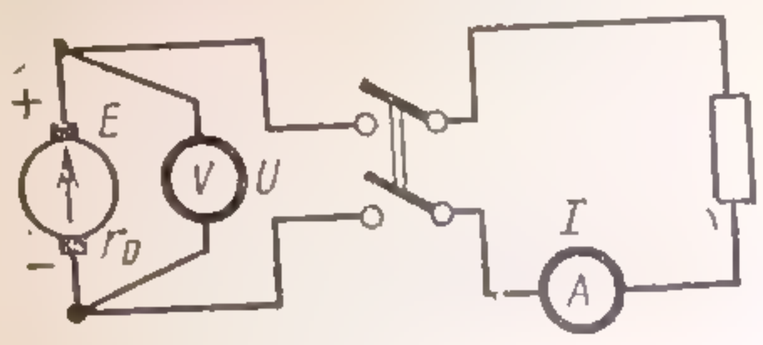


Рис. 2-10. К задачам 2-31, 2-35.

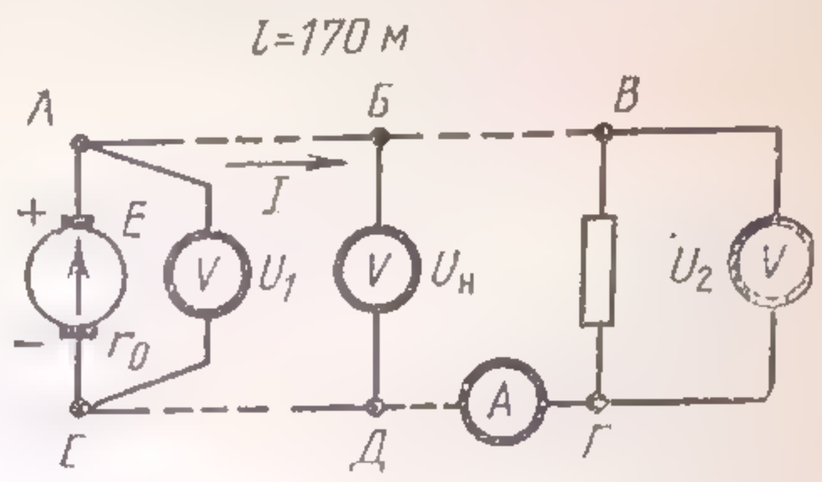


Рис. 2-11. К задаче 2-38.

2-32. При замыкании накоротко щелочного аккумулятора с э. д. с. 1,2 В ток составил $I_{к.з}=4$ А. При каком сопротивлении внешней цепи можно получить в цепи этого аккумулятора ток 1 А?

2-33. Падение напряжения внутри источника э. д. с. $U_0=2$ В, э. д. с. источника 12 В, сопротивление внешней цепи 5 Ом. Определить напряжение на выводах источника, ток в цепи, внутреннее сопротивление источника r_0 и составить уравнение баланса мощностей.

2-34. Используя данные предыдущей задачи, построить графически изменения тока в цепи I, мощности источника P_1, мощности, передаваемой во внешнюю цепь P_2, напряжения на выводах источника U и электрического к. п. д. η в функции переменного внешнего сопротивления r. При построении графика взять следующие значения переменного сопротивления r в омах: 0; 0,5; 1; 2; 5; 11; 23 и ∞. Определить по графику, при каком внешнем сопротивлении имеет место максимум полезной мощности P_2 и каким будет при этом к. п. д.

2-35. Генератор постоянного тока с внутренним сопротивлением 0,5 Ом (рис. 2-10) и э. д. с. 130 В создает в цепи ток 24 А.

Определить сопротивление электроприемника и напряжение на его выводах. Составить уравнение баланса мощностей.

2-36. Мощность потерь энергии внутри источника э. д. с. составляет 25 Вт, его внутреннее сопротивление 0,4 Ом. Определить напряжение и э. д. с. источника, если сопротивление внешней цепи 12 Ом.

2-37. Электрическая цепь, подключенная к выводам генератора постоянного тока (рис. 2-10), имеет сопротивление 12 Ом, генератор развивает э. д. с. 230 В, внутреннее сопротивление генератора 0,6 Ом. Время работы печи составляет 4 ч. Тариф на электроэнергию 4 коп/(кВт·ч).

Условие 1. Определить количество теплоты, выделяемой печью ежесекундно, и стоимость переданной печи энергии.

Условие 2. Определить стоимость потерь энергии внутри генератора.

Условие 3. Определить мощность, развиваемую генератором, и ток в цепи при коротком замыкании.

2-38. По двухпроводной линии из медных проводов (рис. 2-11) сечением $S=4$ мм² энергия передается электроприемнику на расстояние $l=170$ м от генератора с внутренним сопротивлением $r_0=0{,}5$ Ом и э. д. с. $E=240$ В.

Условие 1. Определить ток в цепи I, напряжение на выводах генератора U_1, напряжение на выводах электроприемника U_2, потерю напряжения в проводах ΔU. Сопротивление электроприемника $r=10$ Ом. Определить также, на каком расстоянии от генератора напряжение в сети будет равно номинальному, $U_н=220$ В.

Анализ и решение

Пренебрегая падением напряжения в амперметре за малостью его сопротивления (сотые доли ома) и токами в ветвях вольтметров, учитывая большое сопротивление последних (тысячи ом), внешнюю цепь, изображенную на схеме рис. 2-11, можно рассматривать как неразветвленную, состоящую из последовательно соединенных элементов провода AB с сопротивлением $r_{AB}=r_{пр1}$, электроприемника с сопротивлением $r_{BГ}=r$ и второго (обратного) провода $ГE$ с сопротивлением $r_{ГE}=r_{пр2}$.

Общее напряжение на выводах источника U_{AE} можно определить как сумму напряжений всех последовательно соединенных участков, т. е.

$$U_{AE}=U_{AB}+U_{BГ}+U_{ГE}.$$

Кроме того, это напряжение равно:

$$U_{AE}=E-Ir_0.$$

Следовательно, $E=U_{AE}+Ir_0=U_{AB}+U_{BГ}+U_{ГE}+Ir_0$. Подставляя в это уравнение значения

$$U_{AB}=Ir_{пр1};\ U_{BГ}=Ir \text{ и } U_{ГE}=Ir_{пр2},$$

получаем

$$E=Ir_{пр1}+Ir+Ir_{пр2}+Ir_0,$$

откуда

$$I=\frac{E}{r_{пр1}+r+r_{пр2}+r_0}.$$

Последнее выражение представляет собой закон Ома для замкнутой цепи. Учитывая, что сопротивления обоих проводов одинаковы, т. е. $r_{пр1}=r_{пр2}=r_{пр}$, сопротивление двух проводов сети определим по формуле

$$2r_{пр}=\frac{2l}{\gamma S}=\frac{2\cdot 170}{57\cdot 10^6\cdot 4\cdot 10^{-6}}=1{,}5 \text{ Ом}.$$

Ток на всех участках неразветвленной цепи будет:

$$I=\frac{E}{r_0+2r_{пр}+r}=\frac{240}{0{,}5+1{,}5+10}=20 \text{ А}.$$

Напряжение на выводах генератора

$$U_1 = U_{AE} = E - Ir_0 = 240 - 20 \cdot 0{,}5 = 230 \text{ В}.$$

Напряжение на выводах электроприемника

$$U_2 = Ir = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В}.$$

Потеря напряжения в проводах

$$\Delta U = I \cdot 2r_{пр} = 20 \cdot 1{,}5 = 30 \text{ В}$$

или

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 230 - 200 = 30 \text{ В}.$$

Для определения расстояния l_x от источника питания до места, где напряжение будет равно номинальному, найдем потерю напряжения на этом участке линии

$$\Delta U_x = U_1 - U_{н} = 230 - 220 = 10 \text{ В}.$$

Далее по закону Ома для участка цепи $\Delta U_x = I \cdot 2r_x$, где $2r_x$ — сопротивление обоих проводов, получим:

$$r_x = \frac{\Delta U_x}{2I} = \frac{10}{2 \cdot 20} = 0{,}25 \text{ Ом}.$$

Из формулы сопротивления $r_x = \frac{l_x}{\gamma S}$ определим искомую длину

$$l_x = r_x \gamma S = 0{,}25 \cdot 57 \cdot 4 = 57 \text{ м}.$$

Условие 2. При решении задачи по условию 1 мы пренебрегали падением напряжения в цепи амперметра[1] и токами в ответвлениях вольтметров. Для оценки правильности сделанных допущений определить падение напряжения в амперметре в процентах номинального напряжения ($U_{н} = 220$ В) и ток в цепи вольтметра, присоединенного к сети с номинальным напряжением, в процентах тока электроприемника (рис. 2-11). Сопротивление обмотки амперметра $r_{а} = 0{,}02$ Ом, сопротивление обмотки вольтметра $r_{в} = 10\,000$ Ом.

Определить также напряжение между двумя точками одного провода линии передачи энергии (рис. 2-11), отстоящими одна от другой на расстоянии 2 м ($l_{2м}$).

Анализ и решение

Из решения задачи по условию 1 ток в цепи $I = 20$ А, сопротивление проводов $2r_{пр} = 1{,}5$ Ом, сопротивление электроприемника $r = 10$ Ом.

Падение напряжения или напряжение на участке амперметра $U_{а} = Ir_{а} = 20 \cdot 0{,}02 = 0{,}4$ В, а в процентах номинального напряжения

$$\frac{U_{а}}{U_{н}} 100 = \frac{0{,}4}{220} 100 \approx 0{,}2\%.$$

Ток в ответвлении вольтметра

$$I_{в} = \frac{U_{н}}{r_{в}} = \frac{220}{10\,000} = 0{,}022 \text{ А},$$

[1] В сетях постоянного тока понятия «падение напряжения» и «потеря напряжения» тождественны.

а в процентах тока электроприемника

$$\frac{I_в}{I} 100 = \frac{0{,}022}{20} 100 = 0{,}11\%.$$

Таким образом, вычисленные значения падения напряжения в амперметре и токов, ответвляющихся в вольтметры, достаточно малы, что позволяет не учитывать их в расчетах.

В общем случае можно считать, что при $r_в \gg r$ и $r_а \ll r$ включение измерительных приборов вольтметра и амперметра не вызывает изменения общего сопротивления, а следовательно, тока и напряжения в цепи.

При коротких соединительных проводах можно пренебречь также и потерей напряжения в них.

Например, напряжение между двумя точками одного провода $l_{2м}$ по условию задачи (рис. 2-11)

$$U_{2м} = Ir_{2м} = I\frac{l_{2м}}{\gamma S} = 20\frac{2}{57\cdot 10^6 \cdot 4\cdot 10^{-6}} = 0{,}176 \text{ В}.$$

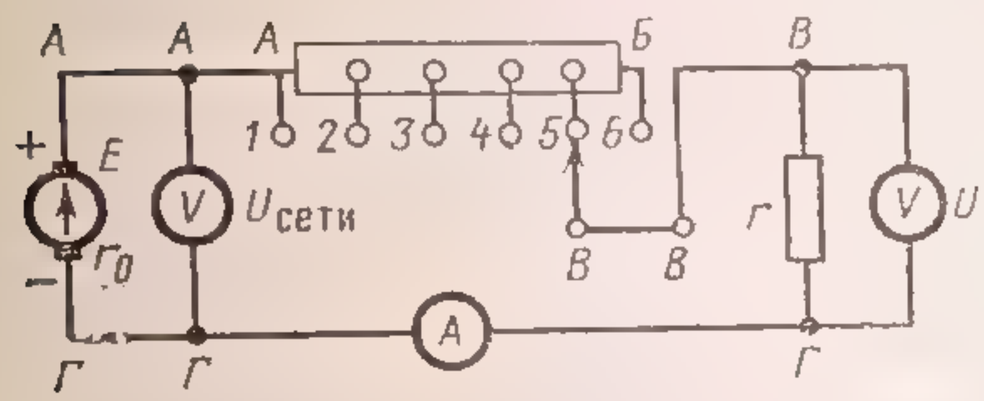


Рис. 2-12. К задачам 2-39, 2-50.

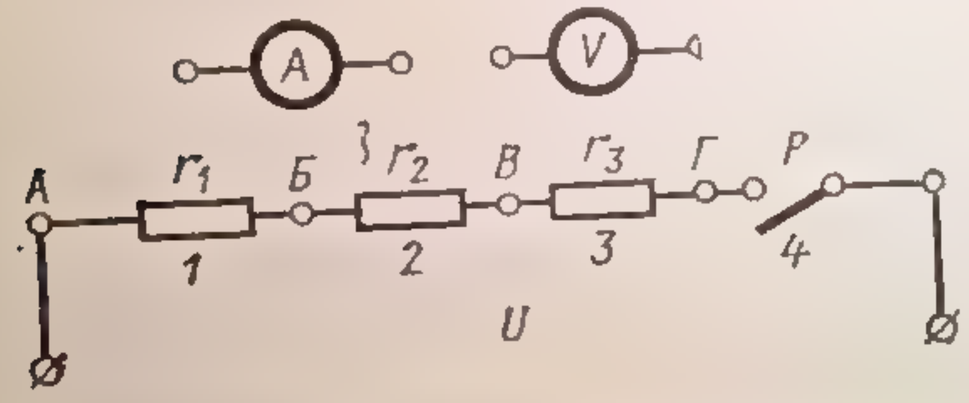


Рис. 2-13. К задачам 2-38, 2-39, 2-44, 2-46, 2-47.

Обычно пренебрегают падением напряжения в коротких соединительных проводах. На схемах соединительные провода показывают прямыми линиями, и если нет специальной оговорки о том, что нужно учитывать сопротивление этих проводов, то потенциалы всех точек данной линии рассматриваются как одинаковые, например точки *А*, *Б* или *В* на схеме рис. 2-11.

2-39*. В цепи (рис. 2-12) реостат содержит пять одинаковых секций сопротивлений. Последовательно с реостатом включен постоянный резистор r. При установке рукоятки реостата в позиции *1* показания приборов следующие: $U_{сети} = 96$ В, $I = 10$ А. При установке рукоятки реостата в позиции *4*: $U_{сети} = 99$ В, $U = 24$ В, $I = 2{,}5$ А. Определить полное сопротивление реостата $r_р$, постоянное сопротивление r, внутреннее сопротивление источника r_0 и его э. д. с. Определить также, как распределяются напряжения в цепи при полностью введенном реостате.

Анализ и решение

Из данных при установке рукоятки реостата в позиции *1* можно определить постоянное сопротивление r:

$$r = \frac{U_{сети}}{I} = \frac{96}{10} = 9{,}6 \text{ Ом}.$$

Для положения рукоятки реостата в позиции 4 уравнение напряжений получит вид: $U_{\text{сети}} = I \cdot 3r_c + U$, где r_c — сопротивление одной секции реостата; в позиции 4 включены три секции реостата. Тогда

$$r_c = \frac{U_{\text{сети}} - U}{3I} = \frac{99 - 24}{3 \cdot 2{,}5} = 10 \text{ Ом}.$$

Следовательно, сопротивление всего реостата, состоящего из пяти секций, $r_p = 5 \cdot 10 = 50$ Ом.

Для определения внутреннего сопротивления r_0 и э. д. с. генератора составим по заданным в условии данным два уравнения по второму закону Кирхгофа (частный случай):

$$E = I_1 r_0 + I_1 r \text{ и } E = I_4 r_0 + I_4 3r_c + I_4 r,$$

где индексы 1 и 4 указывают позиции подвижного контакта реостата.

После подстановки данных уравнения получают вид:

$$E = 10r_0 + 96 \text{ и } E = 2{,}5r_0 + 2{,}5 \cdot 3 \cdot 10 + 24.$$

Решая эти уравнения совместно, получаем:

$$r_0 = 0{,}4 \text{ Ом}; \quad E = 100 \text{ В}.$$

При полностью введенном реостате (рукоятка на позиции 6)

$$E = I_6 r_0 + I_6 r_p + I_6 r.$$

$$\text{Отсюда } I_6 = \frac{E}{r_0 + r_p + r} = \frac{100}{0{,}4 + 50 + 9{,}6} = 1{,}66 \text{ А}.$$

Напряжения на всех участках цепи теперь выразятся

$$U_{\text{сети}} = E - I_6 r_0 = 100 - 1{,}66 \cdot 0{,}4 \approx 99 \text{ В};$$

$$U_{\text{реостата}} = I_6 r_p = 1{,}66 \cdot 50 = 83 \text{ В}; \quad U = I_6 r = 1{,}66 \cdot 9{,}6 = 16 \text{ В}.$$

При малом внутреннем сопротивлении источника напряжение на его выводах $U_{\text{сети}}$ изменяется незначительно и практически может считаться постоянным, а напряжения на участках цепи распределяются пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{U_p}{U} = \frac{Ir_p}{Ir} = \frac{r_p}{r}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 2-38, 2-39**

1. Используя данные условия 1 задачи 2-38*, определить ток в цепи, напряжения U_1 и U_2, потерю напряжения в проводах ΔU при коротком замыкании на выводах электроприемника и при выключенном электроприемнике.

2. Цепь состоит из четырех последовательно соединенных участков, обозначенных цифрами *1—4* (рис. 2-13). Участки *1*, *2*, *3* имеют сопротивления соответственно $r_1 = 30$ Ом, $r_2 = 40$ Ом, $r_3 = 20$ Ом. Участок *4* — однополюсный рубильник. Приложенное к выводам цепи напряжение $U = 90$ В.

Амперметр с ничтожно малым сопротивлением присоединяется поочередно к выводам участка. Определить, в каком случае показа-

ние амперметра будет наибольшим и каким будет это показание: а) при включенном рубильнике, б) при выключенном рубильнике.

3. Решить предыдущий пример, если амперметр заменить вольтметром с неограниченно большим сопротивлением.

4. Три сопротивления, соединенные последовательно (рис. 2-13), относятся как 2 : 3 : 5. Общее напряжение на выводах цепи $U=110$ В. Определить напряжение на выводах каждого сопротивления и ток в цепи, если первое сопротивление составляет 11 Ом.

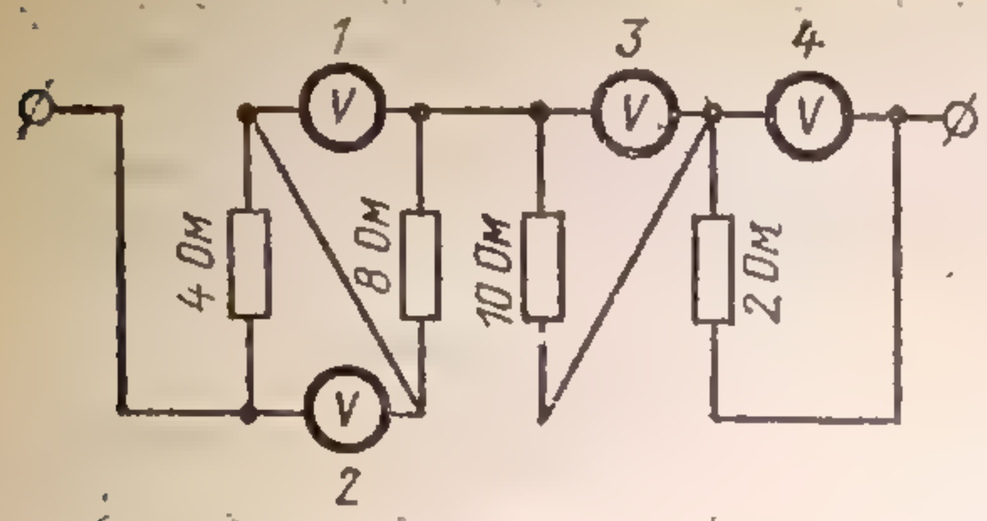


Рис. 2-14. К задаче 2-39.

5. Три сопротивления, соединенные последовательно (рис. 2-13), относятся как 1 : 4 : 5. Общее напряжение на выводах цепи 120 В, а ток в цепи равен 4 А. Определить значения всех сопротивлений.

6. Три равных сопротивления соединены последовательно. Напряжение на каждом из них 20 В. При заземлении одной из указанных на схемах четырех точек (рис. 2-13) потенциал этой точки условно принимается равным нулю. Определить, какую из заданных точек нужно заземлить при замкнутом рубильнике, чтобы потенциал точки *Г* был равен: —60 В, —20 В, —40 В.

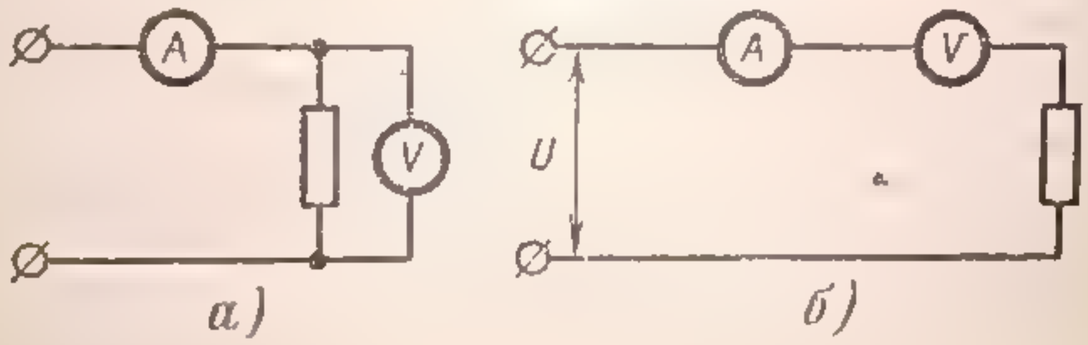


Рис. 2-15. К задаче 2-40.

7. В цепи, изображенной на рис. 2-14, включены четыре вольтметра, обозначенные цифрами *1—4*. Определить, какой вольтметр даст наибольшее (наименьшее) показание при указанных на схеме сопротивлениях участков. Сопротивления вольтметров считать неограниченно большими.

2-40. В нормальных условиях работы ток в цепи 12 А. Вольтметр с сопротивлением 1200 Ом, приключенный к выводам внешнего сопротивления (рис. 2-15, *а*), показывает напряжение 120 В. Определить показания амперметра и вольтметра, если вольтметр ошибочно включить в цепь последовательно (рис. 2-15, *б*).

2-41. Группа ламп накаливания при напряжении 120 В имеет ток 6 А. Определить, как изменится ток в цепи ламп, если последовательно включить в цепь амперметр, сопротивление которого равно 0,1 Ом.

2-42. На двухпроводной линии длиной 8 км, выполненной из медных проводов сечением 25 мм², где-то произошло короткое замыкание. В результате чего благодаря наличию автоматических выключателей линия была отключена. Для определения места короткого замыкания в начале линии к ее выводам была присоединена

аккумуляторная батарея (рис. 2-16). Вольтметр на выводах батареи и амперметр, включенный в цепь, показали 12 В и 3,4 А.

Определить, на каком расстоянии от начала линии произошло короткое замыкание.

2-43. Определить показание амперметра в предыдущей задаче, если при том же подведенном в начале линии напряжении аккумулятора короткое замыкание произошло в конце ее.

2-44. В цепи рис. 2-13, $r_1=10$ Ом, $r_2=4$ Ом, $r_3=8$ Ом, напряжение U_2 на сопротивлении r_2 равно 20 В. Определить напряжения U_1 и U_2 на остальных участках, напряжение на выводах цепи U и составить уравнение баланса мощностей.

2-45. Для предыдущей задачи определить потенциалы точек *А*, *Б*, *В* и *Г*, поочередно принимая каждую из них за точку нулевого потенциала.

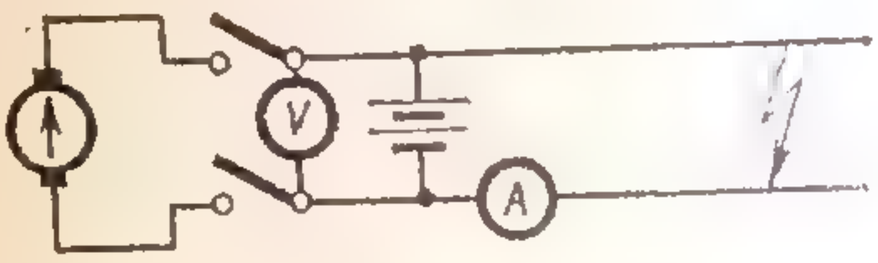


Рис. 2-16. К задаче 2-42.

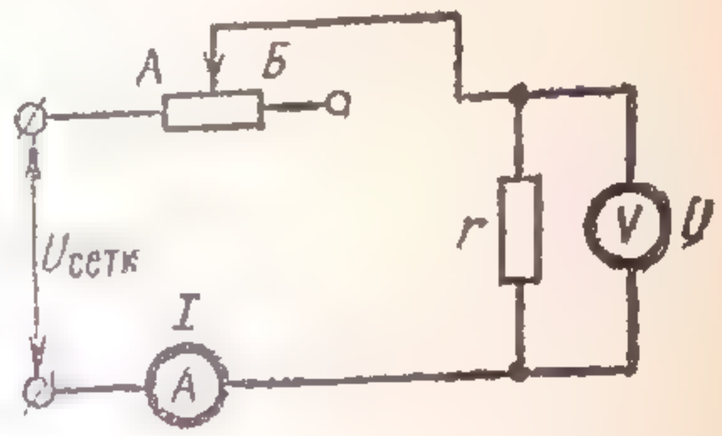


Рис. 2-17. К задачам 2-48; 2-49.

2-46. Для цепи рис. 2-13 $r_1 : r_2 : r_3 = 2 : 3 : 5$. Напряжение между точками *А* и *В* $U_{AB}=60$ В. Определить напряжения на выводах и на всех участках цепи.

2-47. Для цепи рис. 2-13 $r_2 : r_3 = 4 : 11$, напряжение U_2 на выводах сопротивления r_2 равно 24 В, напряжение на выводах цепи $U=120$ В, $r_1=10$ Ом. Определить ток в цепи и сопротивления участков r_2 и r_3.

2-48. В цепь рис. 2-17 включен постоянный резистор с сопротивлением $r=50$ Ом. Напряжение на выводах этого резистора, измеряемое вольтметром, можно изменять в пределах от $U_1=220$ В при положении движка в точке *А* (реостат выведен) до $U_2=100$ В при положении движка в точке *В* (реостат полностью введен). Определить сопротивление реостата $r_р$, включенного последовательно с резистором, и приходящееся на него напряжение при полностью введенном реостате.

2-49. В цепи рис. 2-17 показания амперметра при выведенном реостате (точка *А*) $I_1=3$ А, при полностью введенном реостате (точка *Б*) $I_2=0{,}6$ А. Полное сопротивление реостата $r_р=80$ Ом. Определить постоянное сопротивление r и пределы изменения напряжения на его выводах.

2-50. Последовательно с постоянным резистором r включен реостат, содержащий 5 одинаковых секций сопротивлений (рис. 2-12). При положении подвижного контакта реостата на позиции *5* в цепи устанавливается ток $I=2$ А, напряжение на постоянном резисторе $U=52$ В. Цепь получает питание от источника с э. д. с. $E=125$ В и с внутренним сопротивлением $r_0=0{,}5$ Ом. Определить, как изменятся ток в цепи и напряжение на постоянном резисторе при полностью введенном реостате (рукоятка на позиции *6*) и при выведенном реостате (рукоятка на позиции *1*).

2-51*. Для цепи рис. 2-18, *а* дано: $r_1=1{,}6$ Ом; $r_2=36$ Ом; $r_3=21$ Ом; $r_4=40$ Ом; $r_5=10$ Ом; $r_6=8$ Ом; напряжение на выводах цепи $U=60$ В. Определить токи и напряжения на всех участках цепи.

Решить задачу при равных сопротивлениях по 12 Ом каждое и при напряжении $U=198$ В.

Анализ и решение

Заданная цепь представляет смешанное соединение сопротивлений. Заменим параллельно соединенные сопротивления r_2 и r_3 одним эквивалентным $r_{2,3}$ и сопротивления r_4, r_5, r_6 — одним эквивалентным $r_{4,5,6}$ (рис. 2-18, *б*).

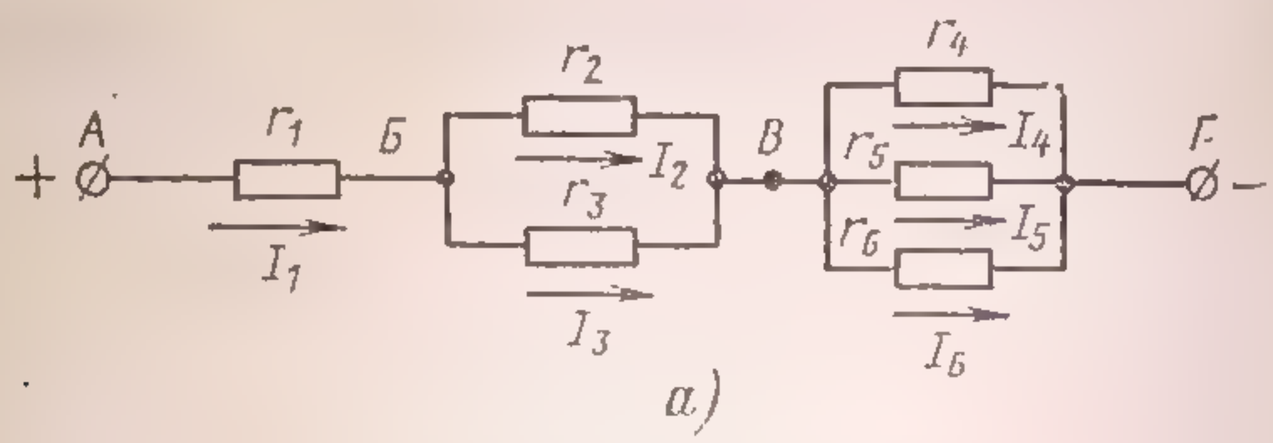


Рис. 2-18. К задаче 2-51.

По первому закону Кирхгофа

$$I_1=I_2+I_3 \text{ и } I_1=I_4+I_5+I_6.$$

Выражая токи через напряжения и соответствующие сопротивления (рис. 2-18, *а* и *б*), получаем:

$$\frac{U_{БВ}}{r_{2,3}}=\frac{U_{БВ}}{r_2}+\frac{U_{БВ}}{r_3} \text{ и } \frac{U_{ВГ}}{r_{4,5,6}}=\frac{U_{ВГ}}{r_4}+\frac{U_{ВГ}}{r_5}+\frac{U_{ВГ}}{r_6}.$$

Сокращая обе части первого равенства на $U_{БВ}$ и второго на $U_{ВГ}$, будем иметь:

$$\frac{1}{r_{2,3}}=\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_3} \text{ и } \frac{1}{r_{4,5,6}}=\frac{1}{r_4}+\frac{1}{r_5}+\frac{1}{r_6}.$$

При параллельном соединении сопротивлений величина, обратная эквивалентному сопротивлению (проводимость), определяется как сумма проводимостей участков.

Для двух параллельных ветвей

$$r_{2,3}=\frac{r_2 r_3}{r_2+r_3}=\frac{36\cdot 24}{36+24}=14{,}4 \text{ Ом}.$$

Для трех параллельных ветвей

$$\frac{1}{r_{4,5,6}}=\frac{1}{40}+\frac{1}{10}+\frac{1}{8}=\frac{10}{40}, \text{ откуда } r_{4,5,6}=4 \text{ Ом}.$$

Заметим, что п
приемников провод
мость должна быть
валентное же сопро
противление любой
Теперь эквивал
ное соединение) опр

$$r_{экв}=r_1+$$

Тогда ток в нер

При последова
на участках равны:

Напряжения на

$$U_{АБ}=I_1 r_1=3\cdot$$

Проверка $U_{АГ}=U_A$
Токи в ветвях

$$I_2=\frac{U_{БВ}}{r_2}=$$

Проверка $I_1=I$
Токи разветвля
ветвей

$$\frac{I_2}{I_3}=\frac{r_3}{r_2}$$

$$I_5=\frac{U_{ЕГ}}{r_5}=$$

Проверка $I_1=I_4$
При n равных п

$$\frac{1}{r_{экв}}$$

Отсюда $r_{экв}=r$
$r_{2,3}=12/2=6$ Ом; r_4
$+4=22$ Ом.

При $U=198$ В I_1

$$I_4=I_5=I_6=$$

$$U_{БВ}=I_1 r_{2,3}=$$

Заметим, что поскольку при параллельном соединении электроприемников проводимости складываются, эквивалентная проводимость должна быть больше, чем проводимость каждой ветви, эквивалентное же сопротивление, наоборот, получается меньше, чем сопротивление любой ветви.

Теперь эквивалентное сопротивление всей цепи (последовательное соединение) определится

$$r_{экв} = r_1 + r_{2,3} + r_{4,5,6} = 1,6 + 14,4 + 4 = 20 \text{ Ом}.$$

Тогда ток в неразветвленной части цепи

$$I_1 = \frac{U}{r_{экв}} = \frac{60}{20} = 3 \text{ А}.$$

При последовательном соединении участков (рис. 2-18, *б*) токи на участках равны:

$$I_1 = I_{2,3} = I_{4,5,6}.$$

Напряжения на участках

$$U_{АБ} = I_1 r_1 = 3 \cdot 1,6 = 4,8 \text{ В}; \quad U_{БВ} = I_1 r_{2,3} = 3 \cdot 14,4 = 43,2 \text{ В};$$

$$U_{ВГ} = I_1 r_{4,5,6} = 3 \cdot 4 = 12 \text{ В}.$$

Проверка $U_{АГ} = U_{АБ} + U_{БВ} + U_{ВГ}$; $60 = 4,8 + 43,2 + 12$ В.

Токи в ветвях

$$I_2 = \frac{U_{БВ}}{r_2} = \frac{43,2}{36} = 1,2 \text{ А}; \quad I_3 = \frac{U_{БВ}}{r_3} = \frac{43,2}{24} = 1,8 \text{ А}.$$

Проверка $I_1 = I_2 + I_3$; $3 = 1,2 + 1,8$ А.

Токи разветвляются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{r_3}{r_2}; \quad \frac{1,2}{1,8} = \frac{24}{36}; \quad I_4 = \frac{U_{ВГ}}{r_4} = \frac{12}{40} = 0,3 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{U_{ЕГ}}{r_5} = \frac{12}{10} = 1,2\text{А}; \quad I_6 = \frac{U_{ВГ}}{r_6} = \frac{12}{8} = 1,5 \text{ А}.$$

Проверка $I_1 = I_4 + I_5 + I_6$; $3 = 0,3 + 1,2 + 1,5$ А.

При n равных параллельно соединенных сопротивлениях

$$\frac{1}{r_{экв}} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \ldots = \frac{n}{r}.$$

Отсюда $r_{экв} = r/n$, поэтому при $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 12$ Ом; $r_{2,3} = 12/2 = 6$ Ом; $r_{4,5,6} = 12/3 = 4$ Ом и $r_{экв} = r_1 + r_{2,3} + r_{4,5,6} = 12 + 6 + 4 = 22$ Ом.

При $U = 198$ В $I_1 = \frac{U}{r_{экв}} = \frac{198}{22} = 9$ А; $I_2 = I_3 = \frac{9}{2} = 4,5$ А;

$$I_4 = I_5 = I_6 = \frac{9}{3} = 3 \text{ А}; \quad U_{АБ} = I_1 r_1 = 9 \cdot 12 = 108 \text{ В};$$

$$U_{БВ} = I_1 r_{2,3} = 9 \cdot 6 = 54 \text{ В}; \quad U_{ВГ} = I_1 r_{4,5,6} = 9 \cdot 4 = 36 \text{ В}.$$

*Вопросы и упражнения к задаче 2-51**

1. Два сопротивления 6 и 4 Ом соединены параллельно. Опре... делить эквивалентное сопротивление цепи.

2. Какое сопротивление следует включить параллельно с ка... тушкой, имеющей сопротивление 1,01 Ом, чтобы эквивалентное со... противление получилось равным 1 Ом?

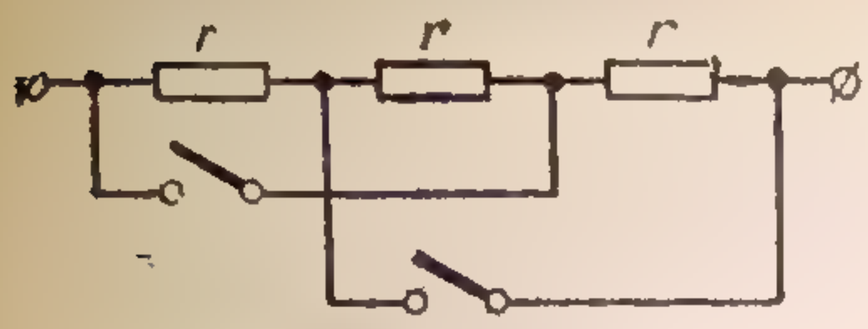


Рис. 2-19. К задаче 2-51.

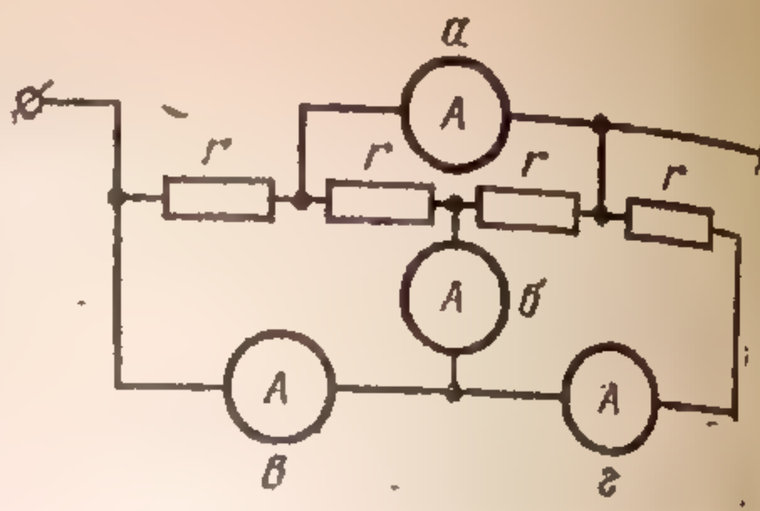


Рис. 2-20. К задаче 2-51.

3. Два сопротивления $r_1=24$ Ом и $r_2=16$ Ом соединены параллельно. Ток в неразветвленной части цепи $I=10$ А. Определить токи в параллельных ветвях I_1 и I_2 и напряжение между точками разветвления.

4. Как изменятся эквивалентное сопротивление трех одинаковых параллельно включенных электроприемников и ток в неразветвленной части цепи, если к ним параллельно подключить еще шесть таких же электроприемников?

5. Определить эквивалентное сопротивление цепи, изображенной на схеме рис. 2-19, для следующих случаев: а) оба рубильника разомкнуты; б) оба рубильника замкнуты; в) замкнут один какой-нибудь рубильник.

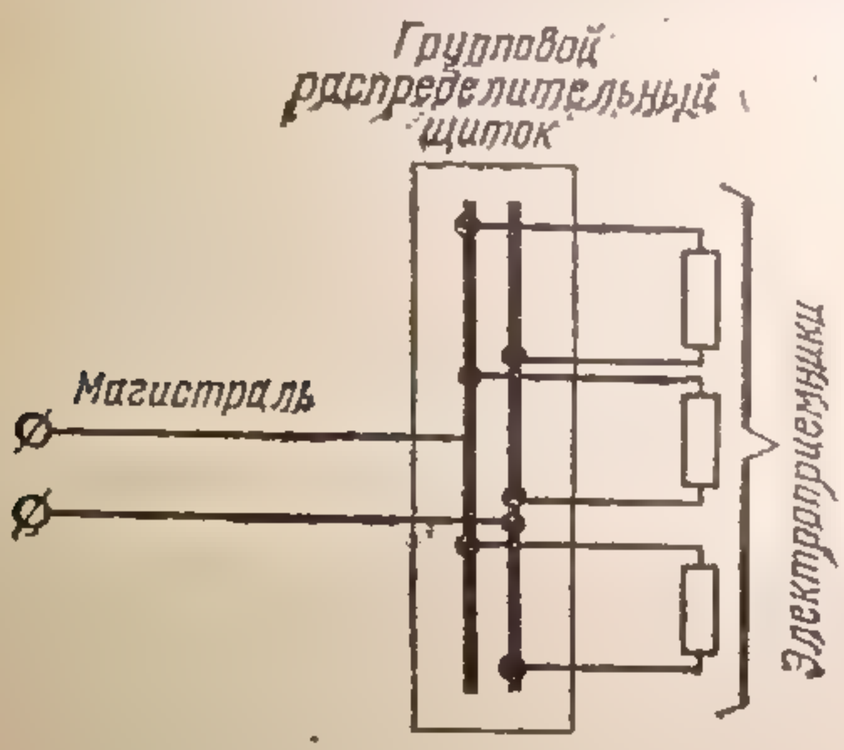


Рис. 2-21. К задаче 2-52.

6. В цепи рис. 2-18 все сопротивления равны по 20 Ом, ток $I_4=1$ А. Определить напряжение на выводах всей цепи.

7. Какой из амперметров, обозначенных буквами *а—г* на схеме рис. 2-20, покажет наибольший ток, если все сопротивления одинаковы. Сопротивлениями амперметров пренебречь.

8. Для схемы рис. 2-20 все сопротивления равны по 12 Ом, приложенное к выводам цепи напряжение 24 В. Определить, какой из амперметров, обозначенных буквами *а—г*, покажет ток 6; 4; 2; 8 А.

2-52. К групповому распределительному щитку, изображенному схематически на рис. 2-21, присоединены три параллельные группы электроприемников, имеющие сопротивления $r_1=22$ Ом; $r_2=10$ Ом; $r_3=100$ Ом. Ток в первой группе равен 10 А. Определить ток в магистральном проводе. Определить также, каким должно быть напряжение на главном распределительном щите, отстоящем от групп...

...пового щитка на расс... мя медными проводам...

2-53. Цепь состои... под напряжение 60 В... одной параллельной в... гой. Определить токи ...

2-54. Три одинако... но под напряжение 1... Определить эквивален... ние и ток каждой из ...

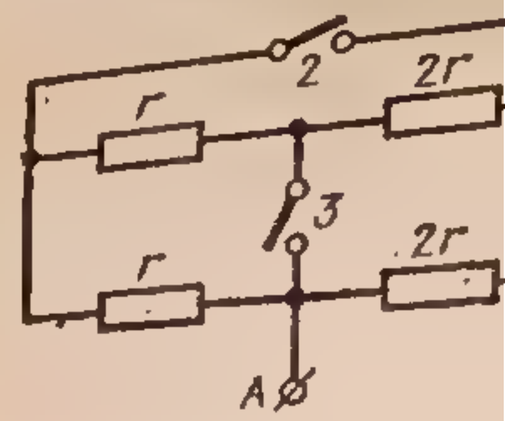
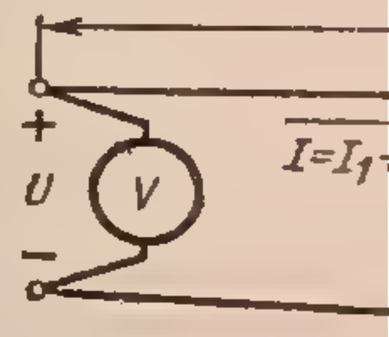


Рис. 2-22. К задач...



Р...

2-55. Путем замык... (рис. 2-22) можно изме... ключенной к выводам ... и $2r$, как указано на с... ние цепи для следующих...
1) все рубильники р...
2) замкнуты рубиль...
3) замкнуты рубиль...
4) замкнуты рубиль...
5) замкнут рубильни...

2-56. Для цепи согл... а внутреннее сопротивле... ников $r_1=60$ Ом; $r_2=40$ ... напряжение на выводах ... баланса мощностей.

пового щитка на расстоянии 100 м, если магистраль выполнена двумя медными проводами сечением 10 мм².

2-53. Цепь состоит из двух параллельных ветвей, включенных под напряжение 60 В. Ток до разветвления 1,5 А. Сопротивление одной параллельной ветви в 2 раза больше, чем сопротивление другой. Определить токи и сопротивления ветвей.

2-54. Три одинаковые лампы накаливания включены параллельно под напряжение 120 В. Общая потребляемая мощность 288 Вт. Определить эквивалентное сопротивление ламп, а также сопротивление и ток каждой из них.

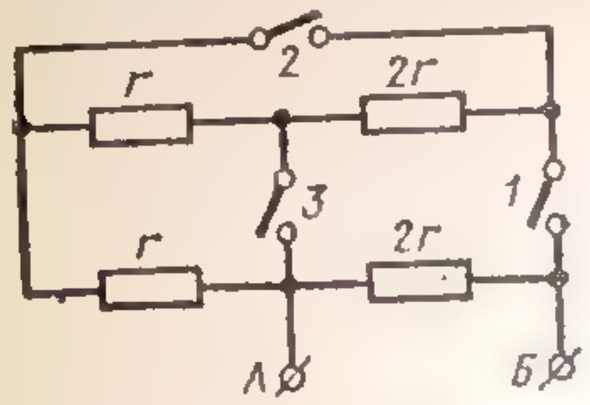


Рис. 2-22. К задаче 2-55.

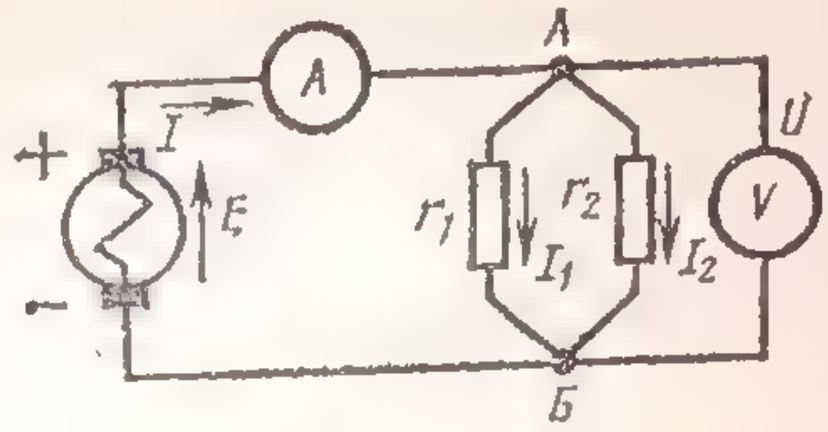


Рис. 2-23. К задачам 2-56, 2-57, 2-58.

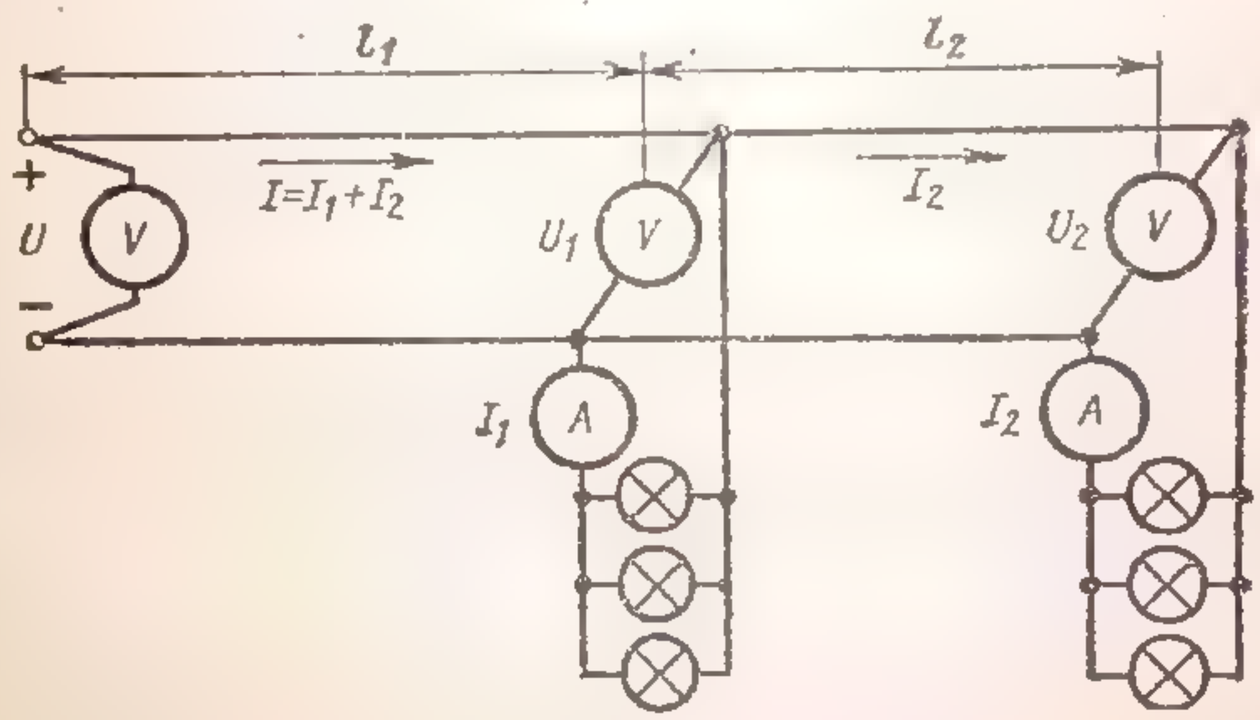


Рис. 2-24. К задаче 2-59.

2-55. Путем замыкания или размыкания рубильников *1—3* (рис. 2-22) можно изменять эквивалентное сопротивление цепи, подключенной к выводам *АБ*. Сопротивления участков цепи равны *r* и 2*r*, как указано на схеме. Определить эквивалентное сопротивление цепи для следующих случаев:

1) все рубильники разомкнуты;
2) замкнуты рубильники *1* и *3* (рубильник *2* разомкнут);
3) замкнуты рубильники *1* и *2* (рубильник *3* разомкнут);
4) замкнуты рубильники *1*, *2* и *3*;
5) замкнут рубильник *1* (остальные разомкнуты).

2-56. Для цепи согласно рис. 2-23 э. д. с. источника $E=100$ В, а внутреннее сопротивление $r_0=1$ Ом. Сопротивления электроприемников $r_1=60$ Ом; $r_2=40$ Ом. Определить токи на всех участках цепи, напряжение на выводах электроприемников и составить уравнение баланса мощностей.

2-57. Для цепи согласно рис. 2-23 $r_1 : r_2 = 4 : 2$. ток в ветви с сопротивлением r_2 равен $I_2 = 1{,}6$ А, э. д. с. источника $E = 26$ В, внутреннее сопротивление источника $r_0 = 0{,}82$ Ом. Определить сопротивления ветвей r_1 и r_2.

2-58. При параллельном соединении сопротивлений r_1 и r_2 между точками A и $Б$ (рис. 2-23) приборы показали: $U_{AБ} = 30$ В, $I = 5$ А. Если те же сопротивления соединить между точками A и $Б$ последовательно, показания приборов изменятся и будут равны $U'_{AБ} = 40$ В, $I' = 1{,}6$ А. Определить сопротивления r_1 и r_2, э. д. с. источника E и его внутреннее сопротивление r_0.

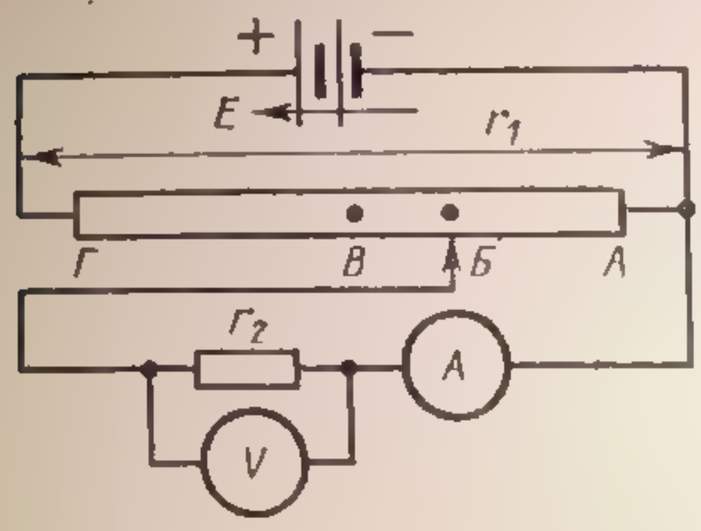


Рис. 2-25. К задаче 2-60.

2-59. По линии из медных проводов сечением 4 мм^2 питаются две группы ламп (рис. 2-24). Одна группа ламп отстоит от начала линии на расстояние $l_1 = 34$ м и имеет ток $I_1 = 30$ А, другая группа находится в конце линии на расстоянии $l_2 = 80$ м от первой группы и имеет ток $I_2 = 20$ А. Напряжение в начале линии $U_1 = 230$ В. Определить напряжения на каждой группе ламп U_1 и U_2, мощность каждой группы ламп P_1 и P_2, потерю напряжения ΔU во всей линии и мощность потерь в проводах ΔP.

2-60. Делитель напряжения с сопротивлением r_1 (рис. 2-25) подключен к источнику с э. д. с. $E = 250$ В. Нагрузка имеет сопротивление r_2. Какими будут показания амперметра и вольтметра, если движок делителя напряжения поочередно устанавливать в точках A, $Б$, B и $Г$. Сопротивления $r_{AБ} = r_1/4$; $r_{AB} = r_1/2$ и $r_{AГ} = r_1$. Сопротивлениями источника питания, амперметра и соединительных проводов пренебречь. Сопротивления r_1 и r_2 даны в таблице вариантов.

	1	2	3	4
r_1, Ом	800	800	100	200
r_2, Ом	1000	400	200	100

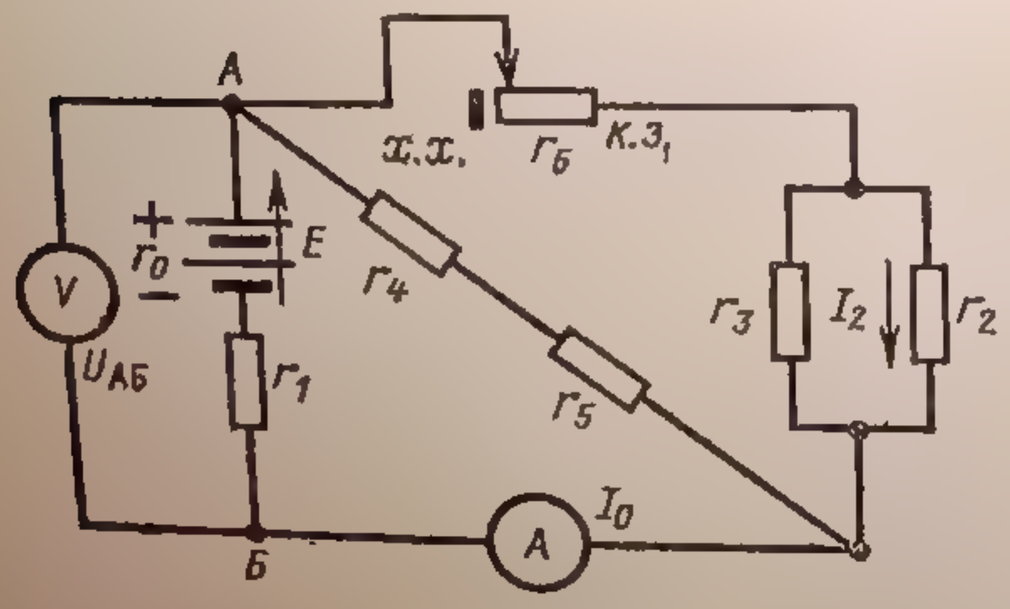


Рис. 2-26. К задаче 2-61.

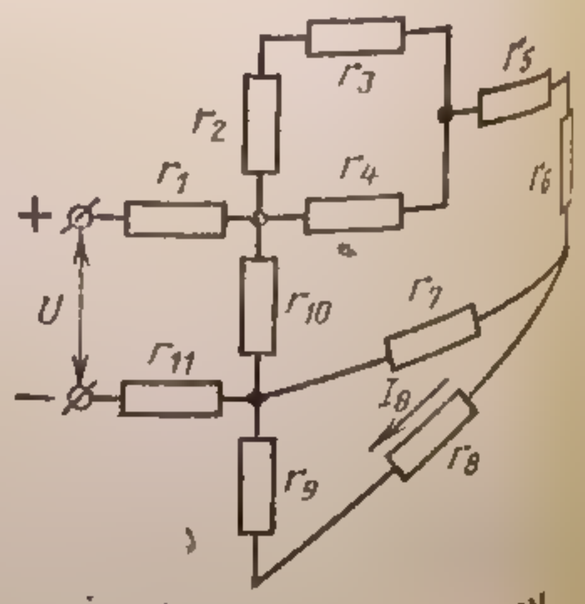


Рис. 2-27. К задачам 2-62, 2-63, 2-64, 2-65.

2-61. Для цепи ри
$= 40$ Ом; $r_3 = 8$ Ом; $r_4 =$
ределить э. д. с. источни
амперметра и вольтме
определить показания т
роткое замыкание) и $r_6 =$
2-62. Для цепи рис.
приложенное напряжени
с сопротивлением r_1.
2-63. Для цепи рис.
ток I_2 на участке с соп
пряжение на выводах це
2-64. Для цепи (ри
$= 50$ Ом; $r_3 = 70$ Ом; $r_4 =$
$= 20$ Ом; $r_9 = 10$ Ом; $r_{10} =$
Определить токи на
цепи.
2-65. Для цепи (рис.
$U = 30$ В; $r_1 = 1{,}25$ Ом; r_2
$r_6 = 6$ Ом: $r_7 = 40$ Ом; $r_8 =$
Определить токи и на

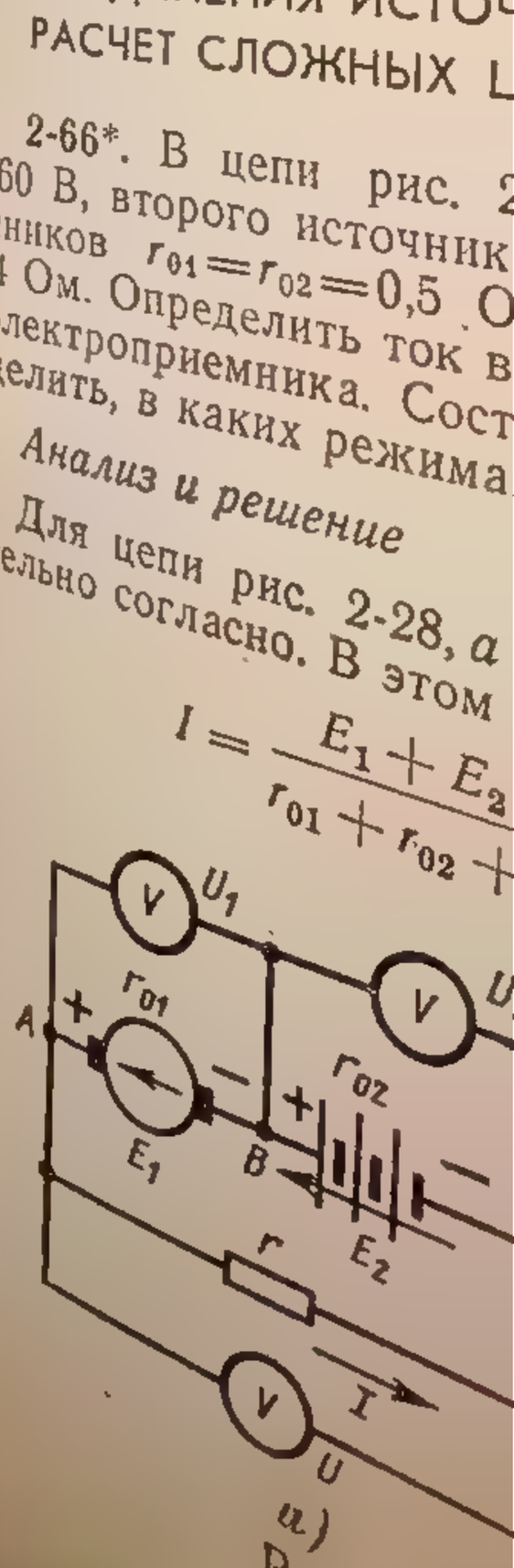
2-5. ПОСЛЕДОВАТЕЛ
СОЕДИНЕНИЯ ИСТО
РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ Ц

2-66*. В цепи рис. 2
$= 60$ В, второго источник
точников $r_{01} = r_{02} = 0{,}5$ О
$= 4$ Ом. Определить ток в
и электроприемника. Сост
ределить, в каких режима

Анализ и решение

Для цепи рис. 2-28, *а*
вательно согласно. В этом

$$I = \frac{E_1 + E_2}{r_{01} + r_{02} +}$$



а)

Рис

2-61. Для цепи рис. 2-26 задано: $r_0=0{,}1$ Ом; $r_1=0{,}9$ Ом; $r_2=40$ Ом; $r_3=8$ Ом; $r_4=4$ Ом; $r_5=2{,}4$ Ом; $r_6=4$ Ом; $I_2=0{,}25$ А. Определить э. д. с. источника и показания измерительных приборов — амперметра и вольтметра. Считая э. д. с. источника неизменной, определить показания тех же приборов при сопротивлении $r_6=0$ (короткое замыкание) и $r_6=\infty$ (обрыв цепи).

2-62. Для цепи рис. 2-27 все сопротивления равны по 13 Ом, приложенное напряжение $U=36$ В. Определить ток I_1 на участке с сопротивлением r_1.

2-63. Для цепи рис. 2-27 все сопротивления равны по 10 Ом, ток I_2 на участке с сопротивлением r_2 равен 1 А. Определить напряжение на выводах цепи U.

2-64. Для цепи (рис. 2-27) задано: $I_8=0{,}4$ А; $r_1=2$ Ом; $r_2=50$ Ом; $r_3=70$ Ом; $r_4=20$ Ом; $r_5=8$ Ом; $r_6=2$ Ом; $r_7=12$ Ом; $r_8=20$ Ом; $r_9=10$ Ом; $r_{10}=25$ Ом; $r_{11}=3$ Ом.

Определить токи на всех участках и напряжение на выводах цепи.

2-65. Для цепи (рис. 2-27) задано: напряжение на выводах цепи $U=30$ В; $r_1=1{,}25$ Ом; $r_2=1$ Ом; $r_3=4$ Ом; $r_4=20$ Ом; $r_5=10$ Ом; $r_6=6$ Ом; $r_7=40$ Ом; $r_8=14$ Ом; $r_9=6$ Ом; $r_{10}=20$ Ом, $r_{11}=1{,}35$ Ом.

Определить токи и напряжения на всех участках цепи.

2-5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ Э. Д. С. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ

2-66*. В цепи рис. 2-28, *а* и *б* э. д. с. первого источника $E_1=60$ В, второго источника $E_2=40$ В. Внутренние сопротивления источников $r_{01}=r_{02}=0{,}5$ Ом. Сопротивление электроприемника $r=4$ Ом. Определить ток в цепи и напряжения на выводах источников и электроприемника. Составить уравнение баланса мощностей и определить, в каких режимах работают источники э. д. с.

Анализ и решение

Для цепи рис. 2-28, *а* оба источника э. д. с. соединены последовательно согласно. В этом случае ток в цепи выразится

$$I=\frac{E_1+E_2}{r_{01}+r_{02}+r}=\frac{60+40}{0{,}5+0{,}5+4}=20\ \text{А}.$$

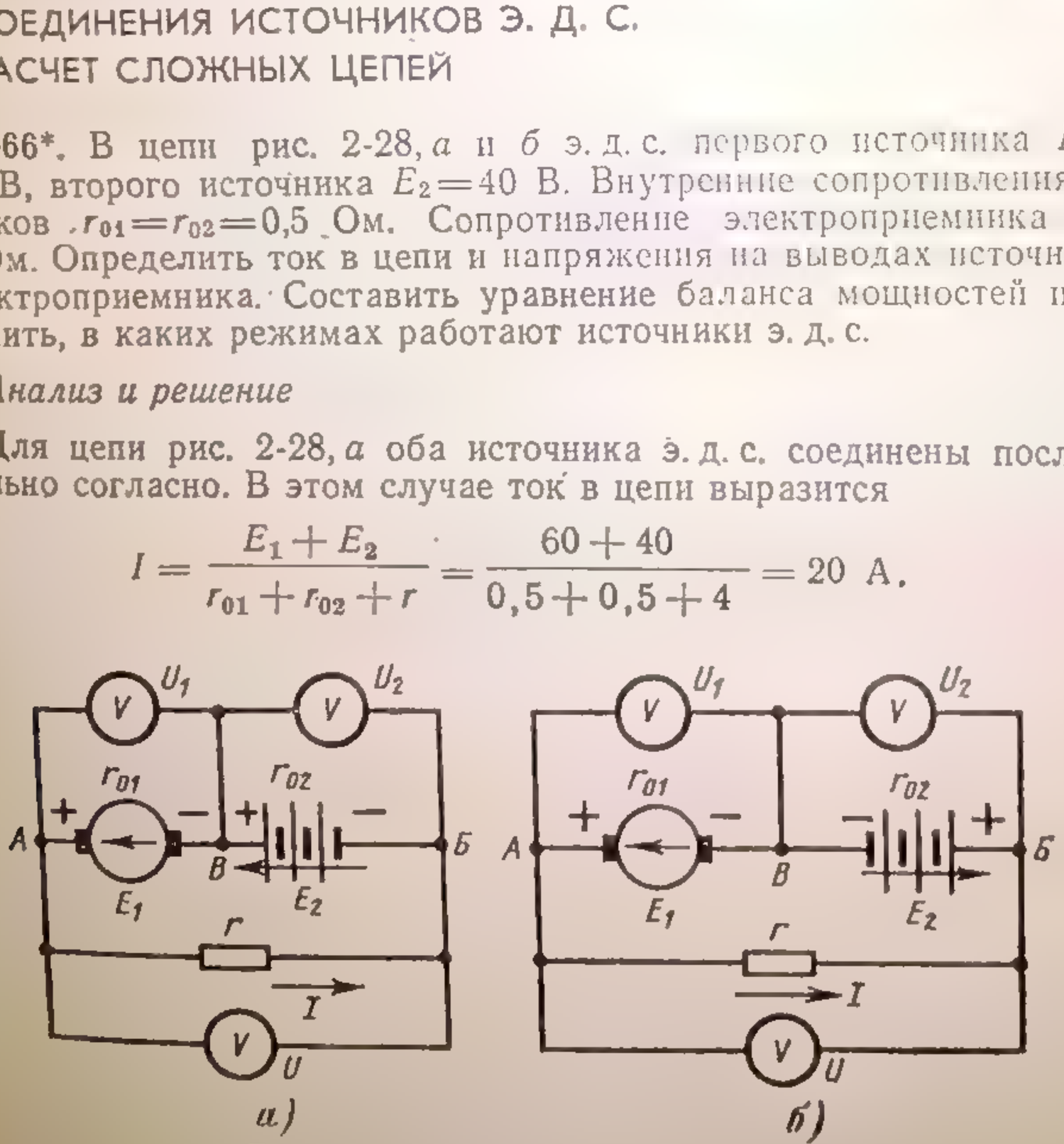


Рис. 2-28. К задачам 2-66, 2-68.

Из выражения для тока следует, что

$$E_1 + E_2 = Ir_{01} + Ir_{02} + Ir. \qquad (1)$$

Полученное уравнение (1) — частный случай второго закона Кирхгофа для данного замкнутого контура. Умножив обе части уравнения (1) на ток I, получим уравнение баланса мощностей $E_1I + E_2I = I^2r_{01} + I^2r_{02} + I^2r$.

Левая часть равенства представляет генерируемую мощность, а правая — потребляемую мощность на всех участках цепи. Общая генерируемая мощность равна сумме мощностей обоих источников, следовательно, оба источника работают в режиме генератора.

Мощность, развиваемая первым источником,

$$P_1 = E_1 I = 60 \cdot 20 = 1200 \text{ Вт},$$

Мощность, развиваемая вторым источником,

$$P_2 = E_2 I = 40 \cdot 20 = 800 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь энергии внутри первого источника

$$P_{01} = I^2 r_{01} = 20^2 \cdot 0{,}5 = 200 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь энергии внутри второго источника

$$P_{02} = I^2 r_{02} = 20^2 \cdot 0{,}5 = 200 \text{ Вт}.$$

Мощность потребителя

$$P = I^2 r = 20^2 \cdot 4 = 1600 \text{ Вт}.$$

Баланс мощностей выразится

$$1200 + 800 = 200 + 200 + 1600.$$

Перенеся в уравнении (1) Ir_{01} и Ir_{02} в левую часть равенства, получим:

$$(E_1 - Ir_{01}) + (E_2 - Ir_{02}) = Ir.$$

Разность между э. д. с. и внутренним падением напряжения выражает напряжение на выводах источника, работающего в режиме генератора. Следовательно, напряжение на выводах первого источника

$$U_1 = E_1 - Ir_{01} = 60 - 20 \cdot 0{,}5 = 50 \text{ В}.$$

Напряжение на выводах второго источника

$$U_2 = E_2 - Ir_{02} = 40 - 20 \cdot 0{,}5 = 30 \text{ В}.$$

Напряжение на выводах потребителя

$$U = Ir = 20 \cdot 4 = 80 \text{ В}.$$

Проверка.

$$U_1 + U_2 = U; \quad 50 + 30 = 80 \text{ В}.$$

Для цепи рис. 2-28, *б* оба источника соединены последовательно встречно. В этом случае ток цепи выразится

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + r_{02} + r} = \frac{60 - 40}{0{,}5 + 0{,}5 + 4} = 4 \text{ А}.$$

Из выражения для тока следует:

$$E_1 - E_2 = Ir_{01} + Ir_{02} + Ir. \qquad (2)$$

Уравнение (2) — частный случай второго закона Кирхгофа для данного замкнутого контура.

Перенеся E_2 в правую часть уравнения (2) и умножив обе части равенства на ток I, получим уравнение баланса мощностей

$$E_1 I = E_2 I + I^2 r_{01} + I^2 r_{02} + I^2 r.$$

По закону сохранения энергии левая часть равенства представляет генерируемую мощность, а правая — потребляемую мощность на всех участках цепи. Из уравнения баланса мощностей следует, что в режиме генератора работает здесь только один источник э. д. с. (первый), а второй работает в режиме потребителя.

Мощность первого источника э. д. с. (генератора)

$$P_1 = E_1 I = 60 \cdot 4 = 240 \text{ Вт}.$$

Мощность второго источника э. д. с. (потребителя) [1]

$$P_2 = E_2 I = 40 \cdot 4 = 160 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь энергии внутри первого источника

$$P_{01} = I^2 r_{01} = 4^2 \cdot 0{,}5 = 8 \text{ Вт}.$$

Мощность, преобразуемая в теплоту внутри второго источника,

$$P_{02} = I^2 r_{02} = 4^2 \cdot 0{,}5 = 8 \text{ Вт}.$$

Мощность электроприемника

$$P_{02} = I^2 r_{02} = UI = 4^2 \cdot 4 = 64 \text{ Вт}.$$

Проверка баланса мощностей: $P_1 = P_2 + P_{02} + P_{01} + P$, т. е.

$$240 = 160 + 8 + 8 + 64 \text{ Вт}.$$

Перенеся в уравнении (2) E_2 в правую, а Ir_{01} в левую части равенства, получим:

$$(E_1 - Ir_{01}) = (E_2 + Ir_{02}) + Ir$$

или

$$U_1 = U_2 + U.$$

Напряжение на выводах источниках э. д. с., работающего в режиме генератора, по-прежнему равно разности э. д. с. и внутреннего падения напряжения, а напряжение на выводах источника э. д. с., работающего в режиме потребителя, равно сумме э. д. с. и внутреннего падения напряжения. Таким образом,

$$U_1 = E_1 - Ir_{01} = 60 - 4 \cdot 0{,}5 = 58 \text{ В};$$

$$U_2 = E_2 + Ir_{02} = 40 + 4 \cdot 0{,}5 = 42 \text{ В}.$$

Напряжение на потребителе

$$U = Ir = 4 \cdot 4 = 16 \text{ В}.$$

[1] Второй источник э. д. с. может быть представлен батареей аккумуляторов в режиме зарядки. При этом потребляемая электрическая энергия преобразуется в химическую энергию и частично в теплоту.

Проверка уравнения для напряжений показывает правильность выполненных расчетов:

$$U_1 = U_2 + U; \quad 58 = 42 + 16.$$

2-67*. Два генератора с внутренним сопротивлением $r_{01}=0{,}5$ Ом и $r_{02}=0{,}2$ Ом работают параллельно, питая общий электроприемник с сопротивлением $r=2$ Ом (рис. 2-29). Электродвижущие силы генераторов $E_1=138$ В, $E_2=124{,}8$ В.

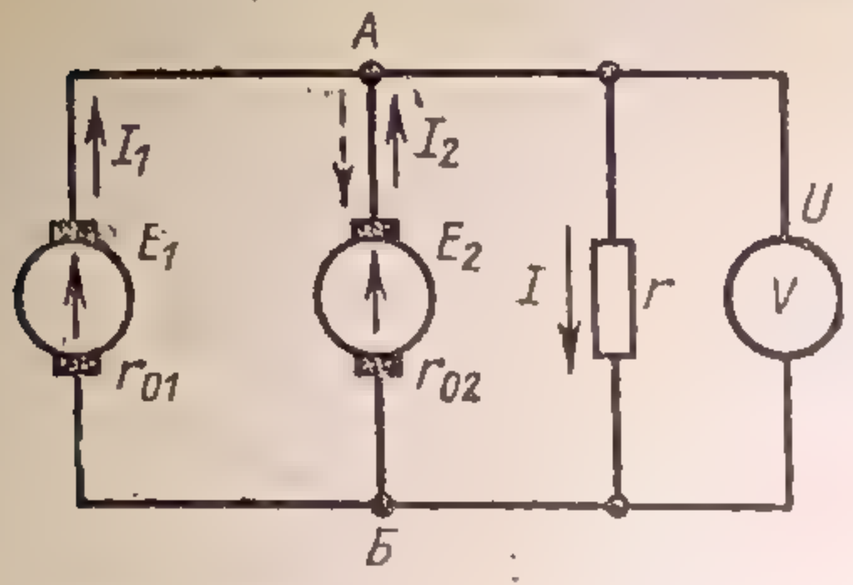


Рис. 2-29. К задаче 2-67.

Условие 1. Определить значения и направления токов генераторов I_1 и I_2, ток потребителя I и напряжения U на выводах потребителя. Составить уравнение баланса мощностей.

Анализ и решение

Предполагая, что оба источника работают в генераторном режиме, задаемся направлениями токов на схеме, как показано на рис. 2-29. Напряжения на выводах источников и потребителя энергии, соединенных параллельно, должны быть равны, т. е. $U_1=U_2=U$.

С учетом выбранных направлений токов и заданных направлений э. д. с. можно написать:

$$U_1 = E_1 - I_1 r_{01}; \quad U_2 = E_2 - I_2 r_{02} \text{ и } U = Ir.$$

Приравнивая правые части полученных уравнений попарно, будем иметь:

$$E_1 - I_1 r_{01} = E_2 - I_2 r_{02}; \quad E_1 - I_1 r_{01} = Ir \text{ и } E_2 - I_2 r_{02} = Ir.$$

Перенеся э. д. с. в левые части уравнений, а падения напряжений в правые, получим окончательно следующие три уравнения, выражающие для трех имеющихся в заданной цепи замкнутых контуров второй закон Кирхгофа:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_{01} - I_2 r_{02}; \tag{1}$$

$$E_1 = I_1 r_{01} + Ir; \tag{2}$$

$$E_2 = I_2 r_{02} + Ir. \tag{3}$$

Таким образом, второй закон Кирхгофа, устанавливающий, что *для любого замкнутого контура алгебраическая сумма э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжений на всех участках контура*, распространяется на любую электрическую цепь, как неразветвленную, так и разветвленную.

Для определения трех неизвестных токов в данной задаче нужно составить три уравнения с тремя неизвестными. При этом все уравнения должны быть независимыми одно от другого, т. е. ни одно из них не должно вытекать из остальных.

Однако любое из трех уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа, является следствием двух остальных. Например, уравнение (3) получается, если из уравнения (2) вычесть уравнение (1). Уравнение (2) получится, если сложить уравнения (1) и (3), и т. д.

В качестве независимых можно взять любые два уравнения. Возьмем, например, уравнения (1) и (2). Недостающее уравнение составим по первому закону Кирхгофа для точки A или $Б$:

$$I_1 + I_2 = I \text{ или } 0 = I - I_1 - I_2.$$

Теперь мы имеем три независимых уравнения с тремя неизвестными. Решая эти уравнения совместно, можно определить токи I_1, I_2 и I. Если в результате решения системы уравнений все токи будут иметь положительные значения, это означает, что первоначально мы выбрали правильно направления токов. Если же значение какого-нибудь тока (или токов) получится отрицательным — это значит, что направление этого тока (или токов) выбрано было неверно и на схеме его нужно изменить на обратное.

В данном случае, решая уравнения совместно, получаем $I_1 = 36$ А, $I_2 = 24$ А, $I = 60$ А. Все токи получились положительными — это значит, что направления токов были выбраны правильно и оба источника работают в генераторном режиме, так как у каждого из них направление тока совпадает с направлением э. д. с.

Цепь, на одном или нескольких участках которой направление тока не может быть установлено заранее без предварительного расчета, называется сложной.

В отличие от простой цепи (рис. 2-27, 2-28), где без предварительного расчета легко показать направления токов на всех участках и расчет токораспределения произвести, пользуясь законом Ома, для расчета сложной цепи необходимо еще использовать уравнения Кирхгофа.

Рассмотренная нами цепь является одним из примеров сложной цепи.

Напряжение на выводах электроприемника

$$U = Ir = 60 \cdot 2 = 120 \text{ В}.$$

Для составления уравнения баланса мощностей определим мощности на всех участках цепи.

Полная мощность первого генератора

$$P_1 = E_1 I_1 = 138 \cdot 36 = 4968 \text{ Вт}.$$

Полная мощность второго генератора

$$P_2 = E_2 I_2 = 124{,}8 \cdot 24 = 2995 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь энергии внутри первого генератора

$$P_{01} = I_1^2 r_{01} = 38^2 \cdot 0{,}5 = 648 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь энергии внутри второго генератора

$$P_{02} = I_2^2 r_{02} = 24^2 \cdot 0{,}2 = 115 \text{ Вт}.$$

Мощность потребителя

$$P = UI = 120 \cdot 60 = 7200 \text{ Вт}.$$

Баланс мощностей выразится

$$P_1 + P_2 = P_{01} + P_{02} + P.$$

Подставляя числовые значения, получаем тождество

$$4968 + 2995 = 648 + 115 + 7200 \text{ Вт}.$$

Условие 2. Определить, как нужно изменить э. д. с. генераторов E_1 и E_2 при неизменном токе потребителя $I=60$ А, чтобы токи между генераторами распределялись следующим образом: а) $I_1=I_2$; б) $I_1/I_2=1/2$; в) $I_1/I_2=1/5$; г) $I_1=0$; д) $I_2=0$. Определить для указанных случаев токи генераторов и напряжение на их выводах.

Анализ и решение

Для случая «а» $I_1=I_2=I/2=30$ А. Напряжения на выводах генератора равны напряжению на выводах потребителя:

$$U_1=U_2=U=60\cdot 2=120 \text{ В}.$$

Для определения э. д. с. составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контуров первый генератор — потребитель, второй генератор — потребитель:

$$E_1=I_1 r_{01}+Ir \text{ или } E_1=I_1 r_{01}+U; \quad (1)$$

$$E_2=I_2 r_{02}+Ir \text{ или } E_2=I_2 r_{02}+U. \quad (2)$$

Подставляя в эти уравнения известные числовые данные, получаем:

$$E_1=30\cdot 0{,}5+120=135 \text{ В и } E_2=30\cdot 0{,}2+120=126 \text{ В}.$$

Для случая «б» $I_2=2I_1$; $I=I_1+I_2=I_1+2I_1=3I_1$, откуда $I_1=I/3=60/3=20$ А и $I_2=2I_1=40$ А. Напряжение на выводах генератора и потребителя во всех случаях остается неизменным

$$U_1=U_2=U=Ir=60\cdot 2=120 \text{ В}.$$

Далее, подставляя известные числовые данные в уравнения (1) и (2), составленные по второму закону Кирхгофа, получаем:

$$E_1=20\cdot 0{,}5+120=130 \text{ В}; \quad E_2=40\cdot 0{,}2+120=128 \text{ В}.$$

Аналогично решается задача для остальных случаев, а именно:
Для случая «в» $I_1/I_2=1/5$; $I_2=5I_1$; $I=I_1+I_2=I_1+5I_1=6I_1$; $I_1=I/6=60/6=10$ А и $I_2=50$ А;

$$E_1=I_1 r_{01}+U=10\cdot 0{,}5+120=125 \text{ В и } E_2=I_2 r_{02}+U=$$
$$=50\cdot 0{,}2+120=130 \text{ В}.$$

Для случая «г» $I_1=0$; $I_2=I=60$ А; $E_1=I_1 r_{01}+U=0+120=120$ В и $E_2=I_2 r_{02}+U=60\cdot 0{,}2+120=132$ В.

Для случая «д» $I_2=0$; $I_1=I=60$ А; $E_1=I_1 r_{01}+U=60\cdot 0{,}5+120=150$ В; $E_2=I_2 r_{02}+U=0+120=120$ В.

Результаты решения задачи 2-67 позволяют сделать некоторые важные в практическом отношении выводы. Во втором условии задачи нужно было определить э. д. с. генераторов E_1 и E_2, чтобы обеспечить то или иное распределение нагрузки между генераторами.

Как видно из решения задачи, сравнительно небольшое изменение э.д.с. генераторов вызывает резкое перераспределение нагрузки между работающими генераторами, причем ток во внешней цепи и напряжение поддерживаются неизменными.

В практике перераспределение нагрузки между параллельно работающими генераторами бывает необходимым, например, в связи с перегревом машины или изменением режима нагрузки.

При увеличении э. д. с. генератора его ток будет также увеличиваться, в то же время ток параллельно работающего другого генератора будет уменьшаться.

При уменьшении э. д. с. генератора будут происходить обратные изменения. При этом э. д. с. генератора можно уменьшить настолько, что ток этого генератора станет равным нулю или, другими словами, генератор будет полностью разгружен и работать вхолостую, а вся нагрузка будет перенесена на другой параллельно включенный генератор.

Для того чтобы ток и напряжение во внешней цепи при всех перераспределениях нагрузки между параллельно работающими генераторами оставались неизменными, нужно при увеличении э. д. с. одного генератора одновременно уменьшить э. д. с. второго генератора и наоборот.

Так, из решения задачи видно, что для увеличения тока второго генератора от нуля (условие 2 «д») до 60 А (условие 2 «г») э. д. с. этого генератора нужно было увеличить со 120 до 132 В, а э. д. с. первого генератора уменьшить со 150 до 120 В.

Каждый источник питания рассчитан на определенный номинальный ток, который для вращающихся генераторов, например, нормируется по условиям нагрева, а для аккумуляторов зависит от емкости их в ампер-часах. Параллельная работа источников применяется в тех случаях, когда ток электроприемников превышает номинальный ток одного источника.

Условие 3. Как нужно изменить э. д. с. E_2 второго источника, чтобы этот источник перешел в режим работы электроприемника (например, электродвигателя) при токе $I_2 = 16$ А. Определить токи на остальных участках цепи и напряжения на их выводах.

Анализ и решение

Если второй источник должен работать в режиме электроприемника, то ток его должен быть направлен противоположно э. д. с. Изменив направление тока I_2 на обратное, рис. 2-29 (пунктирная стрелка), составим для определения неизвестных I_1, I и E_2 с учетом направлений токов и э. д. с. три уравнения по второму и первому законам Кирхгофа:

1. $E_1 = I_1 r_{01} + Ir$.
2. $E_2 = -I_2 r_{02} + Ir$.
3. $I_1 = I_2 + I$.

Подставляя в них числовые данные, получаем:

1. $138 = 0{,}5I_1 + 2I$.
2. $E_2 = -0{,}2 \cdot 16 + 2I$.
3. $16 = I_1 - I$.

Решая эти уравнения совместно,

$$E_2 = 100{,}8 \text{ В}; \quad I_1 = 68 \text{ А}; \quad I = 52 \text{ А}.$$

Напряжения на выводах параллельных ветвей одинаковы, поэтому

$$U_1 = E_1 - I_1 r_{01} = 138 - 68 \cdot 0{,}5 = 104 \text{ В};$$
$$U_2 = E_2 + I_2 r_{02} = 100{,}8 + 16 \cdot 0{,}2 = 104 \text{ В};$$
$$U = Ir = 52 \cdot 2 = 104 \text{ В}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 2-66, 2-67**

1. Что является признаком работы источника э. д. с. в режиме генератора? Как выражается в этом случае напряжение на выводах источника через его э. д. с.?

2. Что является признаком работы источника э. д. с. в режиме электроприемника? Как выражается в этом случае напряжение на выводах источника через его э. д. с.?

3. Для цепи рис. 2-28, *а* э. д. с. генератора $E_1=100$ В, э. д. с. аккумуляторной батареи $E_2=50$. Внутренние сопротивления: генератора $r_{01}=1$ Ом, батареи $r_{02}=4$ Ом. Постоянное, последовательно включенное сопротивление $r=45$ Ом. Определить, происходит ли заряд или разряд аккумуляторной батареи. Определить также показания всех измерительных приборов.

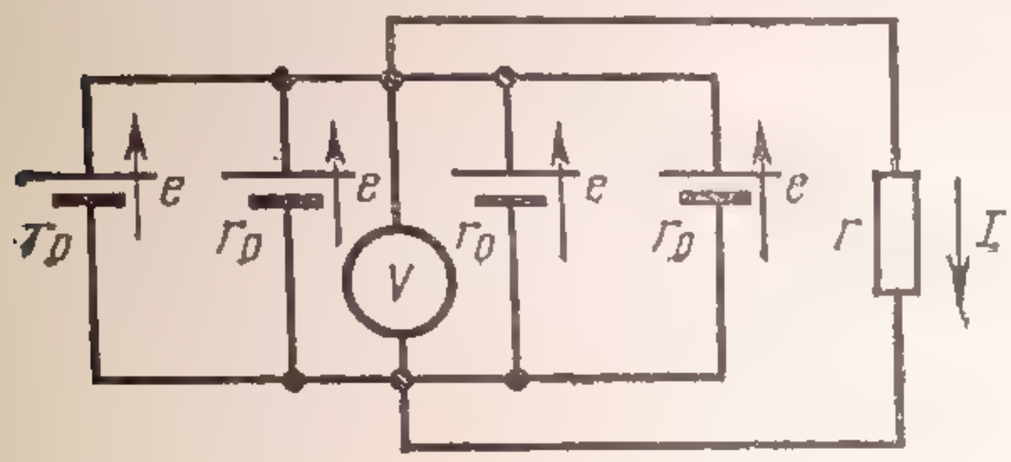


Рис. 2-30. К задачам 2-67, 2-69.

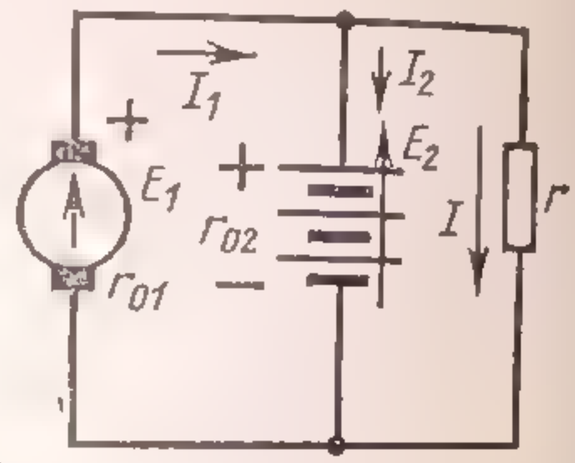


Рис. 2-31. К задаче 2-67.

4. Решить предыдущий пример для цепи 2-28, *б*.

5. Аккумуляторная батарея состоит из четырех щелочных аккумуляторов, соединенных последовательно. Электродвижущая сила каждого аккумулятора 1,2 В, а внутреннее сопротивление его 0,5 Ом. Определить, во сколько раз ток короткого замыкания всей батареи больше тока короткого замыкания одного аккумулятора.

6. Аккумуляторная батарея состоит из четырех параллельно включенных аккумуляторов (рис. 2-30). Электродвижущая сила каждого аккумулятора $E_A=2$ В, внутреннее сопротивление каждого аккумулятора $r_0=0{,}5$ Ом. Определить напряжение на выводах батареи, если ток во внешней цепи равен 4 А. Определить также токи короткого замыкания всей батареи и одного аккумулятора.

7. Для питания электроустановки нужно собрать аккумуляторную батарею на напряжение 6 В и ток 8 А.

Батарея должна быть собрана из аккумуляторов, имеющих э. д. с. по 2 В и рассчитанных на номинальный ток 4 А. Определить, сколько потребуется аккумуляторов для батареи и как нужно их соединить? Нарисовать схему соединения аккумуляторов.

8. К выводам генератора параллельно включены батарея аккумуляторов и электроприемник (нагревательный прибор) с сопротивлением r (рис. 2-31). Направление токов и э. д. с. указаны на схеме. Батарея имеет э. д. с. $E_2=108$ В. Внутренние сопротивления генератора и батареи $r_{01}=0{,}4$ Ом, $r_{02}=0{,}2$ Ом. Токи генератора и батареи $I_1=25$ А, $I_2=10$ А.

Установить, происходит ли заряд или разряд аккумуляторов. Определить напряжение U, э. д. с. генератора E_1, ток нагревательного прибора I и его сопротивление r.

9. Батарея аккумуляторов с э. д. с. $E_2=118$ В присоединена параллельно с сопротивлением r к выводам генератора с э. д. с. $E_1=$

= 130 В (рис. 2-31). В зависимости от сопротивления r батарея может работать в режиме генератора (батарея разряжается), электроприемника (батарея заряжается), холостого хода и короткого замыкания. Определить, какому из указанных режимов соответствуют следующие данные для напряжения U на выводах цепи:

а) $U = 120$ В; б) $U = 118$ В; в) $U = 0$; г) $U = 116$ В.

Установить, соответствуют ли приведенным данным указанные на схеме рис. 2-31 направления токов.

2-68. Последовательно с генератором, э. д. с. которого $E_1 = 100$ В и внутреннее сопротивление $r_{01} = 0{,}2$ Ом, включена аккумуляторная батарея с э. д. с. $E_2 = 50$ В и внутренним сопротивлением $r_{02} = 0{,}8$ Ом и постоянное внешнее сопротивление $r = 24$ Ом. Определить показания всех измерительных приборов на схеме, мощность генератора P_1 и батареи P_2, мощность P, потребляемую постоянным сопротивлением, мощности потерь энергии в генераторе P_{01} и в батарее P_{02}. Составить уравнение баланса мощностей. Определить также, происходит ли заряд или разряд аккумуляторной батареи. Задачу решить для соединений, выполненных по схемам рис. 2-28, *а* и *б*.

2-69. Аккумуляторная батарея состоит из четырех параллельно включенных аккумуляторов (рис. 2-30). Каждый аккумулятор имеет э. д. с. $E_A = 2$ В и внутреннее сопротивление $r_0 = 0{,}5$ Ом.

Определить ток I во внешней цепи, если внешнее сопротивление $r = 0{,}875$ Ом. Определить также ток в случае работы одного аккумулятора при том же внешнем сопротивлении.

2-70. Составить схему соединения кислотных аккумуляторов в батарею (определить число параллельных групп, число последовательно соединенных аккумуляторов в каждой группе и общее число аккумуляторов), если питающаяся от этой батареи цепь потребляет мощность 0,48 кВт при напряжении 12 В. Электродвижущая сила каждого аккумулятора 2 В, а допустимый разрядный ток $I_{доп} = 4$ А.

2-71. Определить ток короткого замыкания аккумуляторной батареи предыдущей задачи, если внутреннее сопротивление каждого аккумулятора 0,2 Ом.

2-72. В цепи рис. 2-32 э. д. с. генератора $E_1 = 130$ В, э. д. с. батареи $E_2 = 118$ В, внутренние сопротивления генератора и батареи соответственно равны $r_{01} = 0{,}5$ Ом и $r_{02} = 0{,}25$ Ом. В зависимости от сопротивления внешней цепи на сборных шинах устанавливается напряжение 120, 118, 116 В и 0. Определить для каждого из этих случаев токи по значению и направлению: генератора I_1, аккумуляторной батареи I_2, потребителей I и внешнее сопротивление r.

2-73. Сигнальная аппаратура и группа ламп накаливания получают питание от параллельно работающих генератора постоянного тока и аккумуляторной батареи (рис. 2-32). Общий ток в цепи $I = 10$ А. Электродвижущая сила генератора E_1, э. д. с. аккумуляторной батареи $E_2 = 50$ В, внутренние сопротивления их соответственно равны 0,4 и 0,2 Ом.

Условие 1. Определить э. д. с. генератора E_1, ток генератора I_1, ток батареи I_2, напряжение на выводах генератора и батареи U, полные мощности генератора P_1 и батареи P_2, мощность потерь энергии внутри генератора P_{01} и батареи P_{02}, мощность P_2, переданную электроприемникам, и составить уравнение баланса мощностей для следующих случаев распределения нагрузки между параллельно работающими источниками: а) $I_1 = I_2$; б) $I_1 : I_2 = 3 : 2$; в) $I_2 = 0$.

Условие 2. Найти токораспределение в цепи и составить уравнение баланса мощностей при заданной э. д. с. генератора $E_1 = 60$ В.

Указание. Произвольно задавшись направлениями токов, можно составить два уравнения с двумя неизвестными на основании первого и второго законов Кирхгофа. Решая эти два уравнения совместно, получаем требуемые токи.

2-74. Два генератора с внутренними сопротивлениями $r_{01} = 0{,}2$ Ом, $r_{02} = 0{,}5$ Ом работают параллельно на внешнюю цепь, имеющую сопротивление $r = 2$ Ом (рис. 2-33). Электродвижущая сила первого генератора $E_1 = 130$ В.

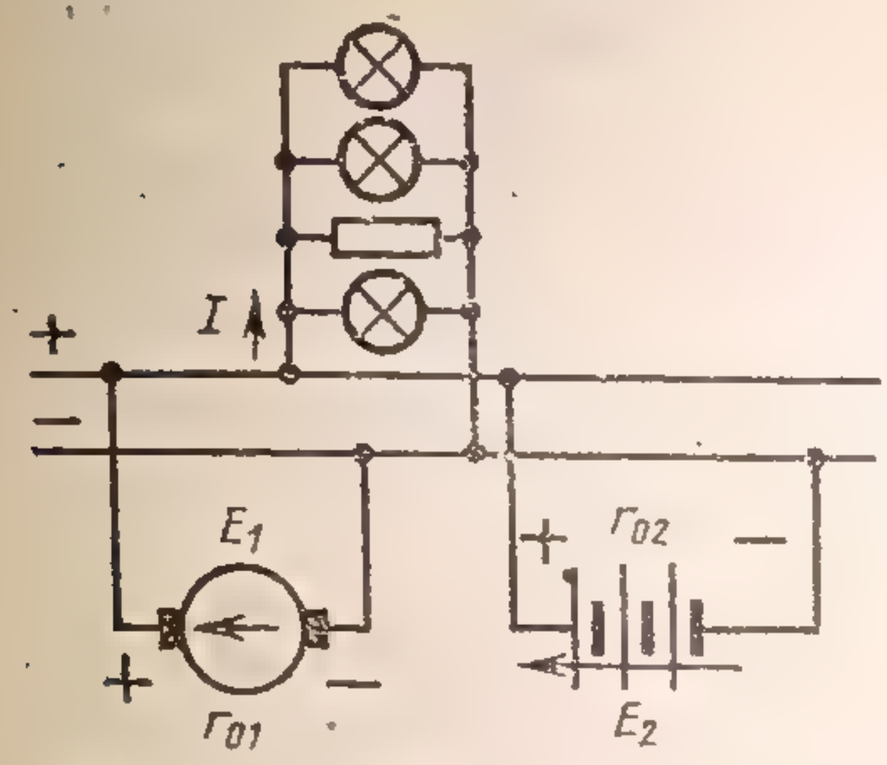


Рис. 2-32. К задачам 2-72, 2-73.

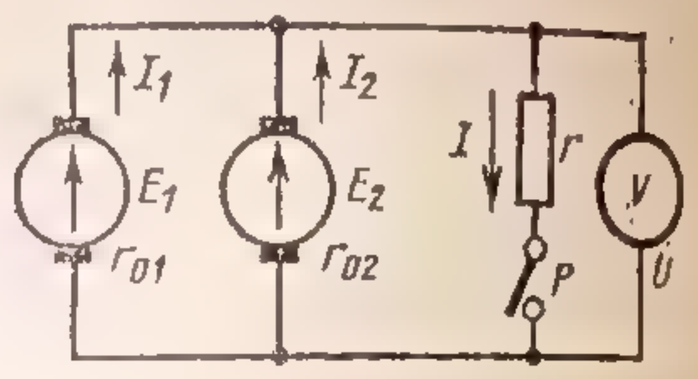


Рис. 2-33. К задачам 2-74, 2-75.

Условие 1. Электродвижущая сила второго генератора $E_2 = 125$ В. Определить по значению и направлению токи генераторов I_1 и I_2, ток во внешней цепи I и показание вольтметра U для трех случаев: а) потребитель включен, б) потребитель выключен, в) выводы потребителя замкнуты накоротко. Сопротивление вольтметра считать неограниченно большим.

Условие 2. При включенном электроприемнике э. д. с. второго генератора E_2 изменяют так, чтобы получить следующие случаи распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами: 1) $I_1 = I_2$; 2) $I_1 = 2I_2$; 3) $I_1 = 0$; 4) $I_2 = 0$; 5) $I_2 = -20$ А. [Знак минус указывает, что второй генератор работает в режиме электроприемника (например, электродвигатель), так как ток его направлен против э. д. с.].

Определить для указанных случаев э. д. с. E_2, токи генераторов, ток и напряжение электроприемника.

2-75. Для цепи рис. 2-33 задано: $r = 1{,}6$ Ом; $r_{01} = 0{,}2$ Ом; $r_{02} = 0{,}8$ Ом. Определить, какими должны быть э. д. с. и токи первого и второго генераторов, чтобы для тех же случаев распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, что и в задаче 2-74 (условие 2), ток электроприемника I оставался неизменным и равным 60 А.

2-76. В трехпроводной системе постоянного тока (рис. 2-34) э. д. с. генераторов равны $E_1 = E_2 = 220$ В, внутренние сопротивления их $r_{01} = r_{02} = 0{,}1$ Ом. От генераторов питаются две группы ламп, сопротивления которых r_1 и r_2. Пренебрегая сопротивлениями проводов, определить линейные токи в проводах AA' и $ББ'$, ток в нулевом проводе OO' и напряжение на группах ламп. Как изменятся ток в цепи и напряжение на каждой группе ламп, если произойдет обрыв нулевого провода. Задач
групп ламп:
1) $r_1 = 5$ Ом

2-77. Три источ
противлениями, как

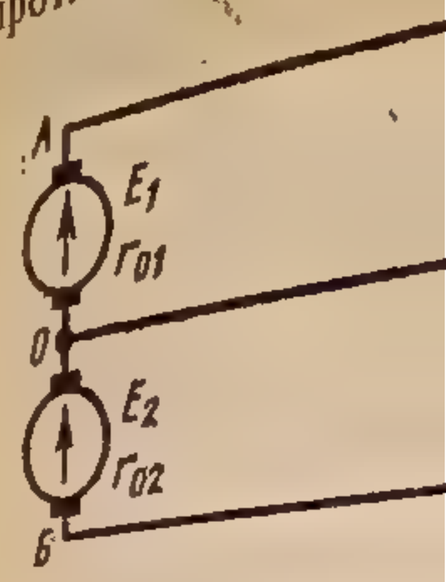


Рис. 2-34. К зад

сопротивлениями ис
тивлениях, пользуяс

E_1, В	E_2, В
60	20
20	20
20	20

2-78*. Для цепи
$r_2 = 6$ Ом, $r_3 = 11$ О
гая внутренним соп
определить ток на у
ем r_5 для следующ
противления: 0; 4; 1
Условие 1.
нять равным 3 Ом.

Анализ и решени

В тех случаях, к
ток на каком-нибуд
независимо от того,
сложная, особенно к
известн при разных
ного участка, целесо
ся методом эквив
Этим методом, в част
расчетах электронны
при определении пог
Сущность метода э
что исследуемый уча

вого провода. Задачу решить для следующих значений сопротивлений групп ламп:

1) $r_1 = 5$ Ом, $r_2 = 5$ Ом; 2) $r_1 = 5$ Ом, $r_2 = 10$ Ом;

3) $r_1 = 5$ Ом, $r_2 = \infty$.

2-77. Три источника э. д. с. соединены с тремя нагрузочными сопротивлениями, как указано на рис. 2-35. Пренебрегая внутренними

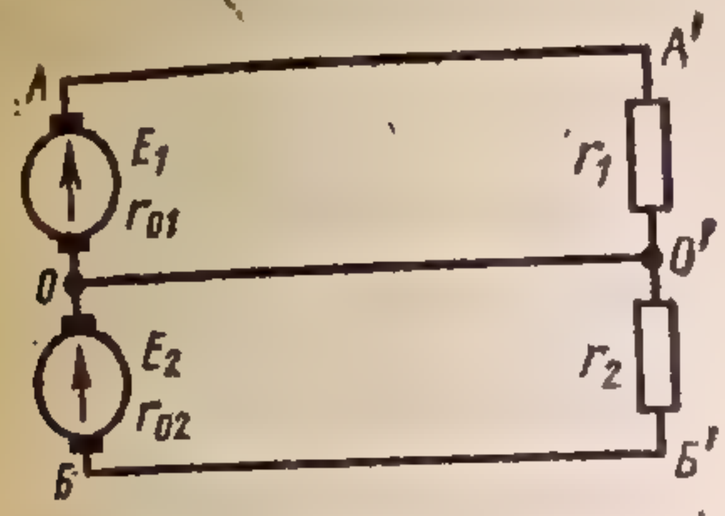


Рис. 2-34. К задаче 2-76.

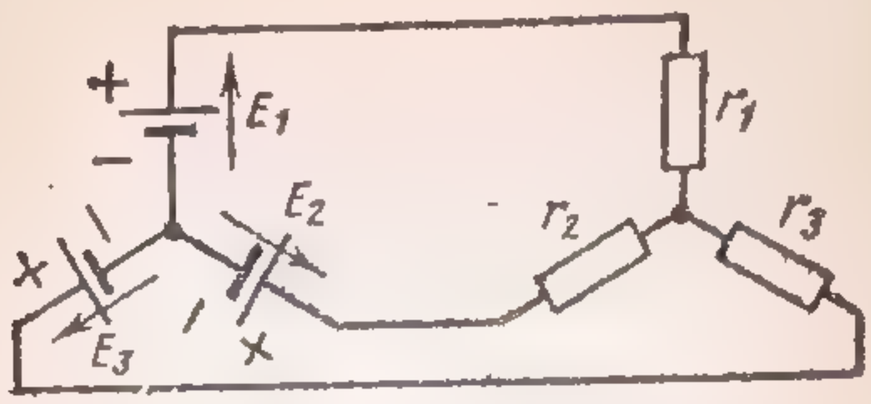


Рис. 2-35. К задаче 2-77.

сопротивлениями источников, определить токи в нагрузочных сопротивлениях, пользуясь данными, приведенными в следующей таблице:

E_1, В	E_2, В	E_3, В	r_1, Ом	r_2, Ом	r_3, Ом
60	20	40	10	10	10
20	20	20	10	10	15
20	20	40	10	20	20

2-78*. Для цепи (рис. 2-36) $E = 45$ В, $r_2 = 6$ Ом, $r_3 = 11$ Ом, $r_4 = 2$ Ом. Пренебрегая внутренним сопротивлением источника, определить ток на участке с сопротивлением r_5 для следующих значений этого сопротивления: 0; 4; 11; 14; 19 Ом.

Условие 1. Сопротивление r_1 принять равным 3 Ом.

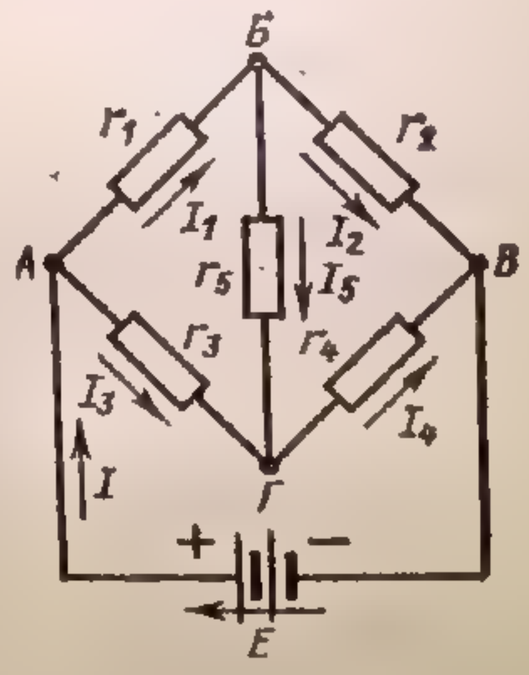


Рис. 2-36. К задаче 2-78.

Анализ и решение

В тех случаях, когда нужно определить ток на каком-нибудь одном участке цепи независимо от того, простая это цепь или сложная, особенно когда расчет нужно произвести при разных сопротивлениях данного участка, целесообразно воспользоваться методом эквивалентного генератора. Этим методом, в частности, пользуются при расчетах электронных усилителей; им также удобно пользоваться при определении погрешностей в различных измерительных схемах. Сущность метода эквивалентного генератора сводится к тому, что исследуемый участок цепи выносится за пределы цепи в качест-

вс внешнего сопротивления (участок $БГ$ с сопротивлением r_5), а все остальное рассматривается как некоторый эквивалентный генератор с э. д. с. $E_{экв}$ и внутренним сопротивлением $r_{экв}$ (рис. 2-37, *а* и *б*). Тогда ток на участке цепи с сопротивлением r_5 определится по уравнению

$$I_5 = \frac{E_{экв}}{r_{экв} + r_5}.$$

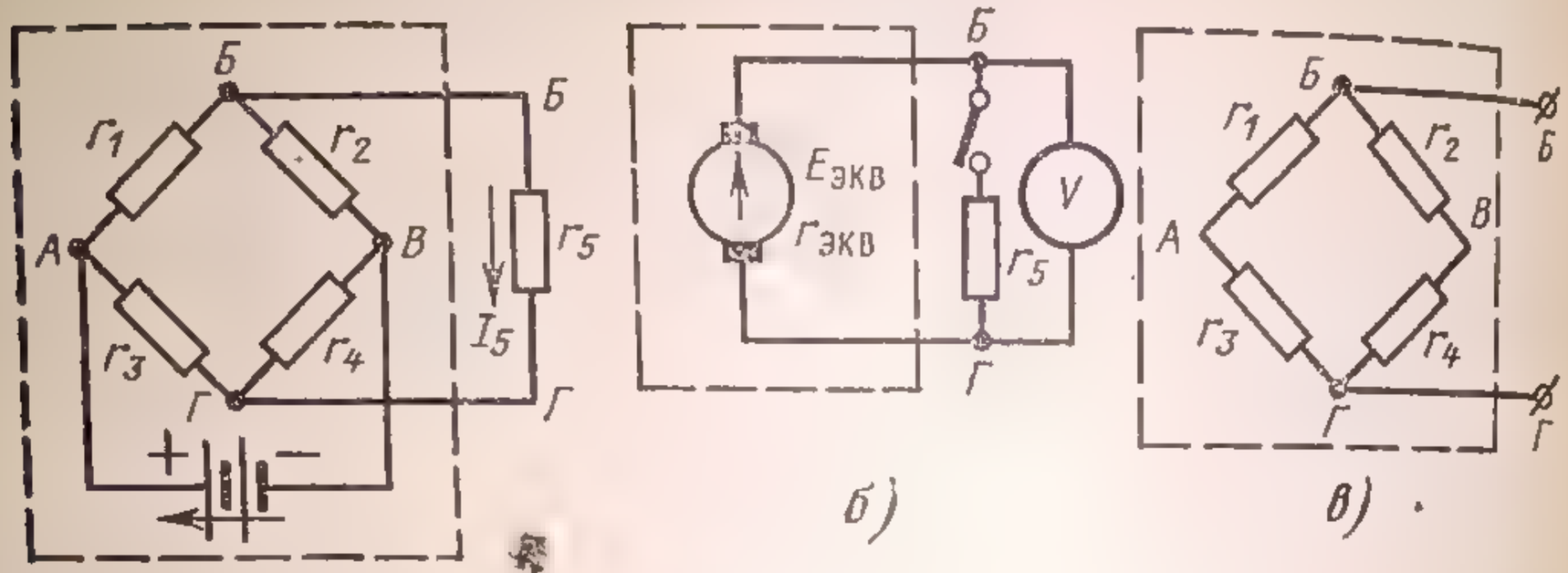


Рис. 2-37. К задаче 2-78.

При разомкнутой внешней цепи напряжение $U_{БГ}$ будет равно э. д. с. $E_{экв}$ эквивалентного генератора (рис. 2-37, *б*). В этом случае

$$I_1 = I_2 = \frac{U_{AB}}{r_1 + r_2}; \qquad I_3 = I_4 = \frac{U_{AB}}{r_2 + r_4}.$$

Напряжения $U_{АБ}$ и $U_{АГ}$ как разности потенциалов соответствующих точек будут:

$$U_{АБ} = \varphi_A - \varphi_B = I_1 r_1 = \frac{U_{AB}}{r_1 + r_2} r_1 \qquad (1)$$

и

$$U_{АГ} = \varphi_A - \varphi_Г = I_3 r_3 = \frac{U_{AB}}{r_3 + r_4} r_3. \qquad (2)$$

Подставляя числовые данные, будем иметь:

$$\varphi_A - \varphi_Б = \frac{45 \cdot 3}{3 + 6} = 15 \text{ В и } \varphi_A - \varphi_Г = \frac{45 \cdot 11}{13} = 38 \text{ В}.$$

Вычитая из большего напряжения меньшее, получаем:

$$(\varphi_A - \varphi_Г) - (\varphi_A - \varphi_Б) = \varphi_Б - \varphi_Г = U_{БГ} = 38 - 15 = 23 \text{ В}.$$

Следовательно, при $r_5 = \infty$ $E_{экв} = U_{БГ} = 23$ В.

Для определения r_0 нужно определить сопротивление между точками $Б$ и $Г$, удалив источник питания между точками A и B и оставив вместо него внутреннее сопротивление этого источника. Так как по условию задачи внутренним сопротивлением источника следует пре-

небречь, точки A и B ш
да $r_{экв}$ выразится:

$r_{экв}$

или, подставляя числовые

$$r_{экв} = \frac{3 \cdot 6}{9} +$$

Электродвижущая си
нее сопротивление его оп
противлением r_5 и поэтом
участке с сопротивлением

$$I_5 = \frac{}{r}$$

Подставляя заданны
токи I_5 в амперах: 6,35; 3

Заметим, что если п
методом эквивалентного
ко уравнениями Кирхгоф
пришлось бы повторять р
му из шести уравнений с

Условие 2. Сопро

Выполняя решение з
неожиданному выводу, ч
(2) следует:

$$U_{АБ} = \varphi_A -$$

$$U_{АГ} = \varphi_A -$$

$$U_{АБ} = U_A$$

Следовательно, $I_5 =$
тивления r_5.

Данная схема (рис. 2
используется в измерительн
на участке с сопротивлени
алов точек $Б$ и $Г$, может
(1) и (2). Вычитая из ур
полученную разность поте

$$\varphi_Б - \varphi_Г =$$

$$= U_{AB} \frac{r_3 r_1}{}$$

небречь, точки A и B нужно замкнуть накоротко (рис. 2-37, *в*). Тогда $r_{экв}$ выразится:

$$r_{экв} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} + \frac{r_3 r_4}{r_3 + r_4},$$

или, подставляя числовые значения,

$$r_{экв} = \frac{3 \cdot 6}{9} + \frac{11 \cdot 2}{13} = 2 + 1{,}695 = 3{,}695 \text{ Ом}.$$

Электродвижущая сила эквивалентного генератора и внутреннее сопротивление его определяются при отключенном участке с сопротивлением r_5 и поэтому не зависят от этого сопротивления. Ток на участке с сопротивлением r_5

$$I_5 = \frac{E_{экв}}{r_{экв} + r_5} = \frac{23}{3{,}695 + r_5}.$$

Подставляя заданные значения r_5, получаем соответствующие токи I_5 в амперах: 6,35; 3; 1,57; 1,3; 1,02.

Заметим, что если при решении данной задачи не пользоваться методом эквивалентного генератора, а пользоваться, например, только уравнениями Кирхгофа, то для каждого заданного значения r_5 пришлось бы повторять решение заново и решать каждый раз систему из шести уравнений с шестью неизвестными.

Условие 2. Сопротивление $r_1 = 33$ Ом.

Выполняя решение задачи, как и по условию 1, мы приходим к неожиданному выводу, что $E_{экв} = 0$. Действительно, из формул (1) и (2) следует:

$$U_{АБ} = \varphi_A - \varphi_Б = \frac{U_{AB} r_1}{r_1 + r_2} = \frac{45 \cdot 33}{39} = \frac{45 \cdot 11}{13};$$

$$U_{АГ} = \varphi_A - \varphi_Г = \frac{U_{AB} r_3}{r_3 + r_4} = \frac{45 \cdot 11}{13}, \text{ т.е.}$$

$$U_{АБ} = U_{АГ} \text{ и } U_{БГ} = U_{АГ} - U_{AB} = 0.$$

Следовательно, $I_5 = \frac{E_{экв}}{r_{экв} + r_5} = 0$ при любом значении сопротивления r_5.

Данная схема (рис. 2-36) получила название мостовой и широко используется в измерительной технике. Условие равновесия моста (ток на участке с сопротивлением r_5 отсутствует), т. е. равенства потенциалов точек $Б$ и $Г$, может быть получено в общем виде из уравнений (1) и (2). Вычитая из уравнения (2) уравнение (1) и приравнивая полученную разность потенциалов нулю, получаем:

$$\varphi_Б - \varphi_Г = U_{AB} \frac{r_3}{r_3 + r_4} - U_{AB} \frac{r_1}{r_1 + r_2} =$$

$$= U_{AB} \frac{r_3 r_1 + r_3 r_2 - r_3 r_1 - r_4 r_1}{(r_3 + r_4)(r_1 + r_2)} = 0.$$

Отсюда следует, что $r_3r_2-r_4r_1=0$ и $r_3r_2=r_4r_1$. Условием равновесия в мостовой схеме является равенство произведений сопротивлений несмежных сторон.

Вопросы и упражнения к задаче 2-78

1. Для цепи рис. 2-36 при заданной э. д. с. и сопротивлениях участков составить, не решая, необходимое число уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для определения токов на всех участках цепи.

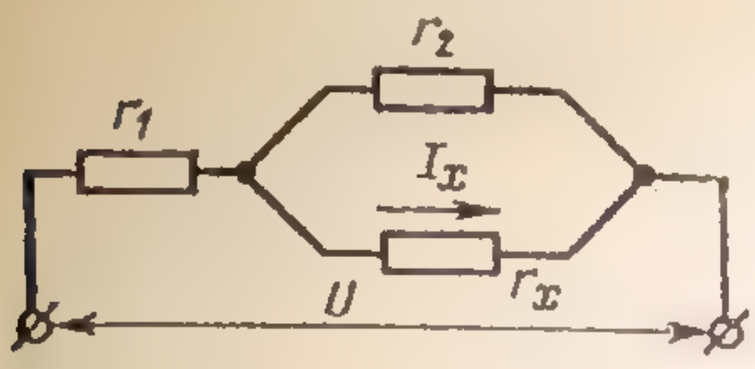


Рис. 2-38. К задачам 2-78, 2-80.

2. Для мостовой схемы (рис. 2-36), находящейся в условиях равновесия, $r_1=4$ Ом, $r_2=2$ Ом, $r_4=100$ Ом, $r_5=50$ Ом. Определить сопротивление r_3.

3. Для цепи рис. 2-38 для определения тока на участке с сопротивлением r_x по методу эквивалентного генератора вычислить э. д. с. эквивалентного генератора $E_{экв}$ и внутреннее сопротивление его $r_{экв}$. Приложенное напряжение $U=50$ В. Сопротивления участков $r_1=60$ Ом, $r_2=40$ Ом.

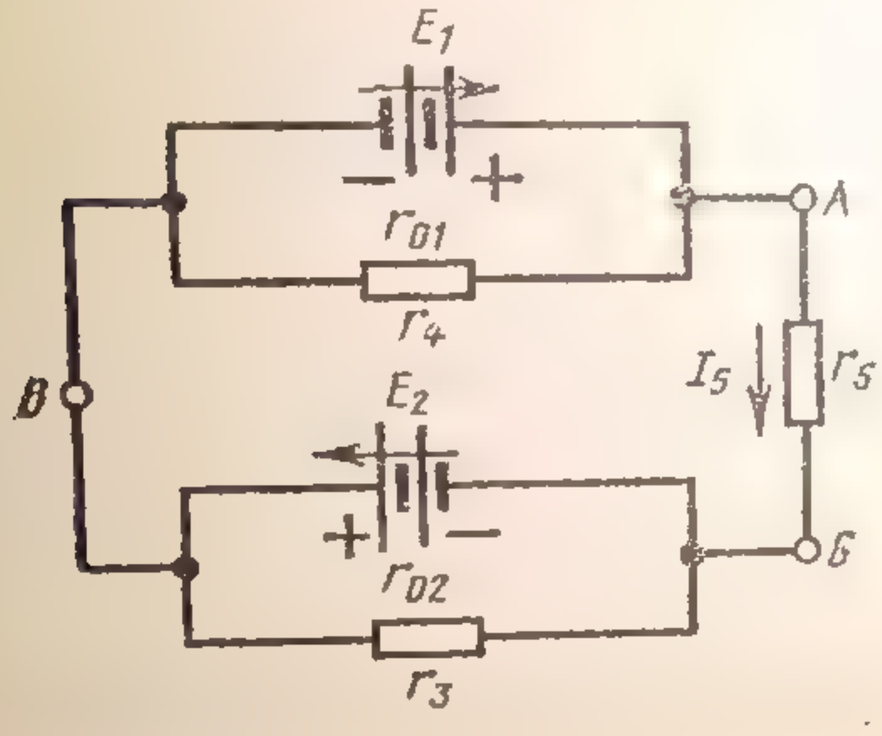


Рис. 2-39. К задачам 2-81, 2-82.

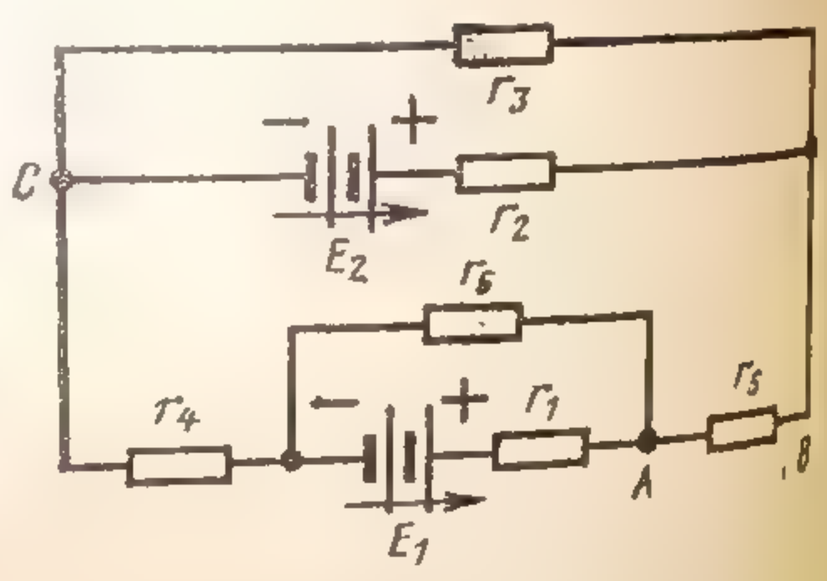


Рис. 2-40. К задаче 2-83.

4. Решить предыдущую задачу, если $r_1=40$ Ом, $r_2=60$ Ом.

2-79. Для цепи рис. 2-36 $r_1=r_2=8$ Ом, $r_3=10$ Ом, $r_4=40$ Ом. $r_5=3$ Ом. На участке с сопротивлением r_5 определить ток I_5 по величине и направлению, если приложенное напряжение $U_{AB}=10$ В.

2-80. Для цепи рис. 2-38 задано: $r_1=10$ Ом, $r_2=40$ Ом, приложенное к выводам цепи напряжение $U=120$ В. Определить сопротивление участка цепи r_x, если по нему проходит ток I_x. Значения I_x принять: 0,75; 1; 2; 3; 4; 6 и 10 А.

2-81. Для электрической цепи рис. 2-39 задано: $E_1=2E_2=60$ В; $r_{01}=r_{02}=1$ Ом; $r_3=r_4=2$ Ом. Определить ток и напряжение на участке с сопротивлением r_5:

$$r_5=\frac{4}{3}\text{ Ом}.$$

2-82. Решить задачу 2-81, если в схеме рис. 2-39 изменить полярность (направление э. д. с.) второго источника.

2-83. Для цепи рис. 2-40 задано: $E_1=25$ В, $r_1=30$ Ом, $r_2=40$ Ом, $r_3=10$ Ом, $r_4=5$ Ом, $r_5=15$ Ом, $r_6=20$ Ом. Определить ток и напряжение на участке с сопротивлением r_5.

Условие 1. Электродвижущая сила $E_2=20$ В.

Условие 2. Электродвижущая сила $E_2=50$ В.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

3-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА В ПРЯМОМ ПРОВОДЕ, КОЛЬЦЕВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКАХ. ИНДУКТИВНОСТЬ

3-1*. Определить электромагнитную силу, действующую на подвесной изолятор высоковольтной линии передачи постоянного тока (рис. 3-1) при коротком замыкании в линии, вызвавшем увеличение

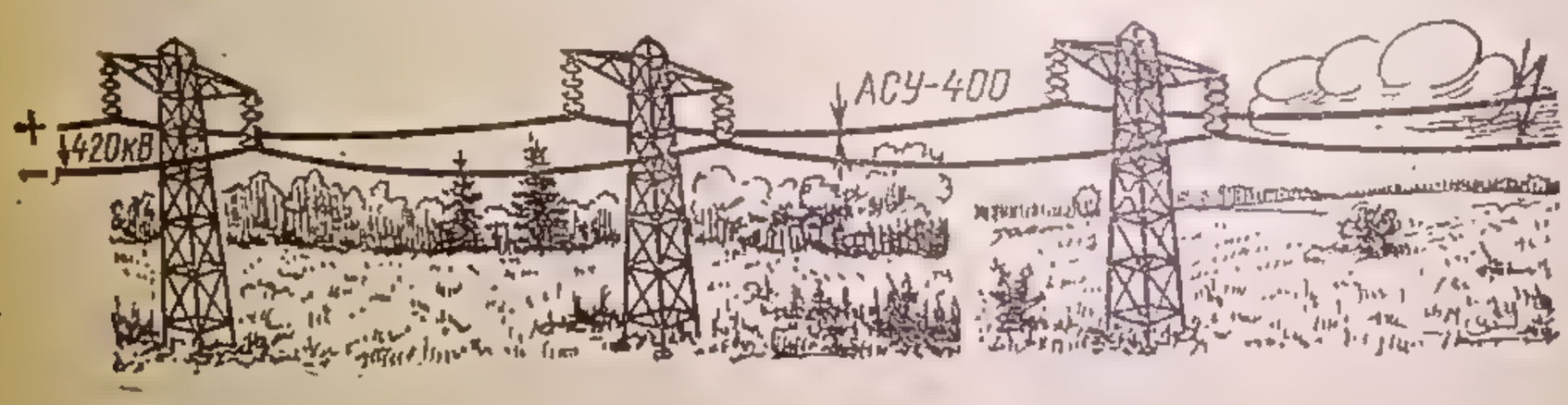


Рис. 3-1. К задаче 3-1.

тока в проводах до 15 000 А. Расстояние между опорами линии передачи (длина пролета) $l=300$ м, расстояние между проводами $a=10$ м.

Анализ и решение

Каждый из параллельных проводов можно рассматривать как провод, находящийся в магнитном поле тока другого провода. Направление электромагнитной силы, действующей на первый провод от тока во втором, F_{12} и силы, действующей на второй провод от тока в первом, F_{21} определится правилом левой руки. Эти силы будут взаимно отталкивающими (рис. 3-2) и соответственно равными

$$F_{12}=B_2 I_1 l \sin 90^\circ \text{ и } F_{21}=B_1 I_2 l \sin 90^\circ.$$

Заменяя магнитные индукции их выражением для прямого провода с током $B_1=\frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$, $B_2=\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}$ и учитывая, что $\sin 90^\circ=1$, получаем

$$F_{12}=\frac{\mu_0 I_2 I_1 l}{2\pi a} \text{ и } F_{21}=\frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

Из этих выражений следует, что

$$F_{12} = F_{21} = F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

В выражении для электромагнитной силы μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}$, или $0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$ Г/м; I_1 и I_2 — токи в проводах, в данном случае $I_1 = I_2 = I_к$, где по условию задачи ток в проводах линии при коротком замыкании $I_к = 15\,000$ А. Каждый из изоляторов воспринимает усилия, приходящиеся на расположенные по обе стороны от него половины двух пролетов (рис. 3-1), или можно считать, что на изолятор действует сила, приходящаяся на весь пролет между изоляторами длиной l.

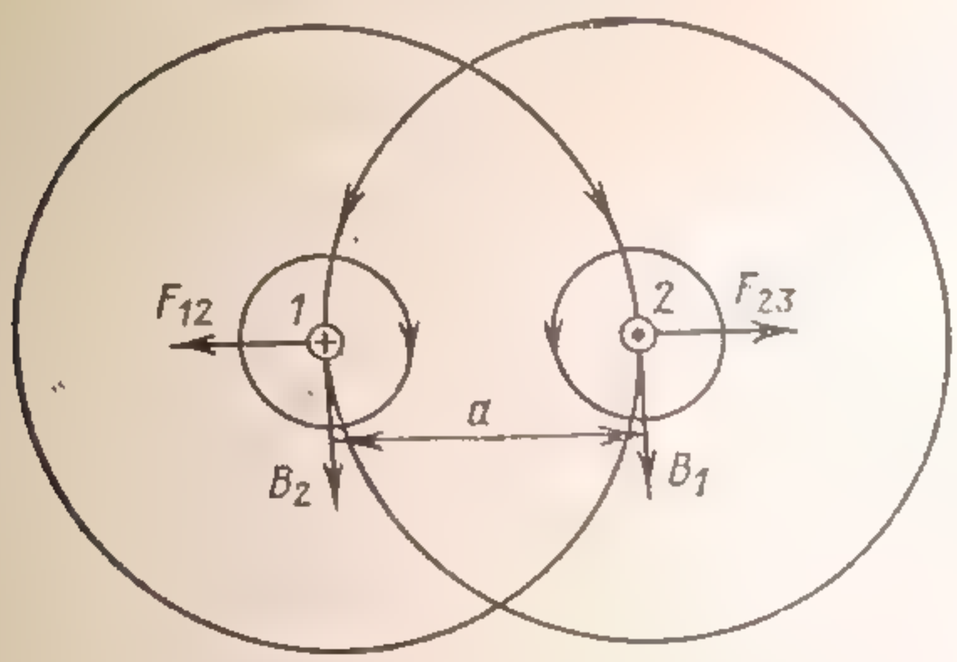


Рис. 3-2. К задаче 3-1.

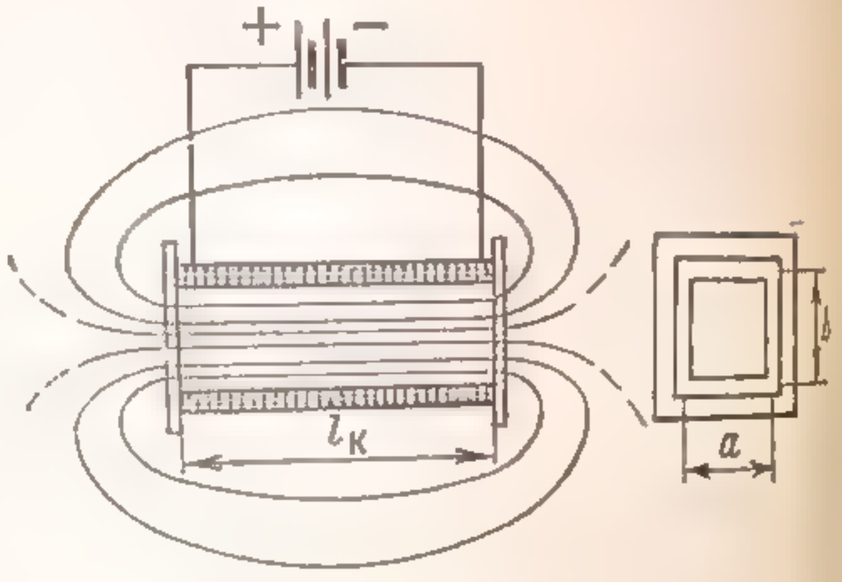


Рис. 3-3. К задаче 3-2.

Следовательно, усилие, нагружающее изолятор (помимо веса провода),

$$F = \frac{\mu_0 I_к^2 l}{2\pi a} = \frac{0{,}4\pi \cdot 10^{-6} (15\,000)^2 \cdot 300}{2\pi \cdot 10} =$$

$$= 1350 \text{ Н} = 137{,}5 \text{ кгс} \quad (1 \text{ Н} = 0{,}102 \text{ кгс}).$$

3-2*. На гетинаксовый каркас квадратного сечения площадью $S_к = 25 \text{ см}^2 = 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и длиной $l_к = 20 \text{ см} = 0{,}2$ м намотана катушка из медного провода длиной $l = 60$ м и поперечным сечением $S = 0{,}5 \text{ мм}^2 = 0{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ (рис. 3-3). По катушке проходит ток $I = 10$ А.

Определить напряжение на выводах катушки, магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в центре катушки, магнитный поток, пронизывающий катушку, и индуктивность катушки. Расчет вести по приближенной формуле.

Анализ и решение

Сторона квадрата, образующая поперечное сечение каркаса катушки,

$$a = \sqrt{S_к} = \sqrt{25 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 5 \text{ см}.$$

Примем приближенно, что средняя длина витка катушки равна периметру ее квадратного сечения

$$l_в = 4a = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 0{,}2 \text{ м}.$$

Отсюда число витков катушки будет:

$$w = \frac{l}{l_в} = \frac{60}{0{,}2} = 300.$$

Для определения напряжения на выводах катушки определим сопротивление ее

$$r = \rho \frac{l}{S} = 0{,}0176 \cdot 10^{-6} \frac{60}{5 \cdot 10^{-6}} = 2{,}1 \text{ Ом}.$$

Значение удельного сопротивления ρ для меди взято из таблицы приложения 3.

Теперь напряжение на выводах катушки

$$U = Ir = 10 \cdot 2{,}1 = 21 \text{ В}.$$

Магнитная индукция в центре катушки определится по приближенной формуле

$$B = \frac{\mu_0 I w}{l_к}.$$

Здесь μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость среды, равная $0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$ Г/м. Подставляя в формулу индукции числовые значения величин, получаем:

$$B = \frac{0{,}4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 300}{20 \cdot 10^{-2}} = 188{,}8 \cdot 10^{-4} \text{ Т}.$$

Магнитный поток, пронизывающий катушку, выразится:

$$\Phi = BS_к = 188{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^{-4} = 4720 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}.$$

Напряженность магнитного поля катушки

$$H = \frac{Iw}{l_к} = \frac{10 \cdot 300}{20 \cdot 10^{-2}} = 15\,000 \text{ А/м}.$$

Напряженность магнитного поля можно определить и по такой формуле

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{188{,}8 \cdot 10^{-4}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 15\,000 \text{ А/м}.$$

Индуктивность катушки L определяется отношением магнитного потокосцепления к току

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{300 \cdot 4720 \cdot 10^{-8}}{10} = 14{,}15 \cdot 10^{-4} \text{ Г} \approx 1{,}4 \text{ мГ}.$$

Если заменить магнитный поток по формуле $\Phi = BS$, а магнитную индукцию $B = \mu_a H$ и $H = Iw/l_{ср}$, то получим другую формулу для определения индуктивности

$$L = \frac{\mu_a w^2 S}{l_{ср}}. \quad (1)$$

Из полученного выражения следует, что индуктивность не зависит от тока и магнитного потока в катушке. Она исключительно зависит от размеров катушки, числа витков ее и абсолютной магнитной проницаемости среды μ_a.

Подставляя числовые данные в формулу для индуктивности, получаем:

$$L = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3}{20 \cdot 10^{-2}} = 1{,}4 \text{ мГ},$$

т. е. тот же результат.

Вопросы и упражнения к задачам 3-1, 3-2

1. На проводник с током $I = 20$ А, расположенный перпендикулярно линиям магнитного поля, действует сила $F = 4$ Н. Активная длина проводника (расположенная в магнитном поле) $l = 0{,}2$ м. Определить магнитную индукцию, выразив ее в системе СИ и в абсолютной системе единиц.

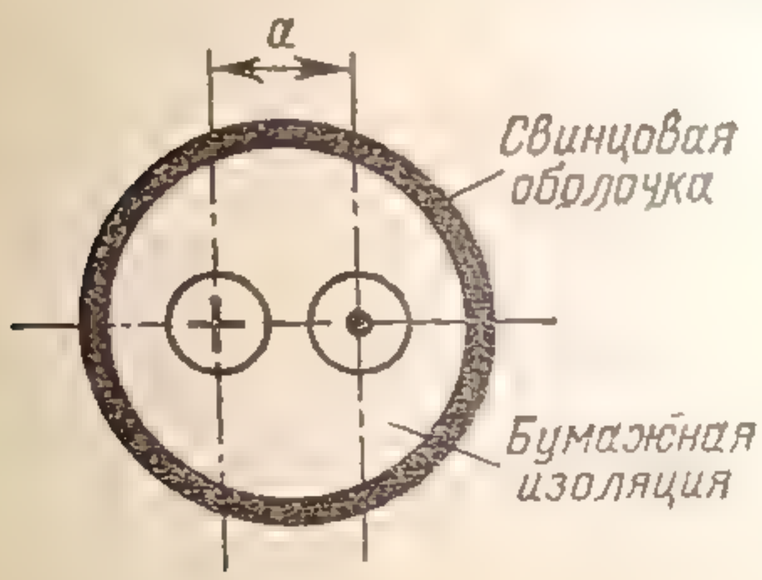


Рис. 3-4. К задаче 3-4.

2. Как изменится решение предыдущей задачи, если при тех же условиях угол между направлениями тока и линий магнитной индукции (линий поля) $\alpha = 30°$.

3. В однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}8$ Т помещен под углом 60° к линиям поля прямой провод длиной $l = 1{,}73$ м. Определить силу, действующую на провод, если по нему проходит ток 10 А.

4. При протекании одинакового тока по двум длинным параллельным проводам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, на каждый метр длины провода действует сила $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Определить ток, протекающий по каждому из проводов.

5. Цилиндрическая катушка с немагнитным сердечником имеет плотность намотки $w/l_к = 40$ витков/см. Ток в катушке $I = 10$ А. Определить:

а) напряженность магнитного поля в центре катушки;

б) магнитную индукцию в центре катушки;

в) магнитный поток, пронизывающий витки катушки, если поперечное сечение ее (площадь витка) $S = 20$ см^2;

г) число витков катушки, если длина ее $l_к = 25$ см;

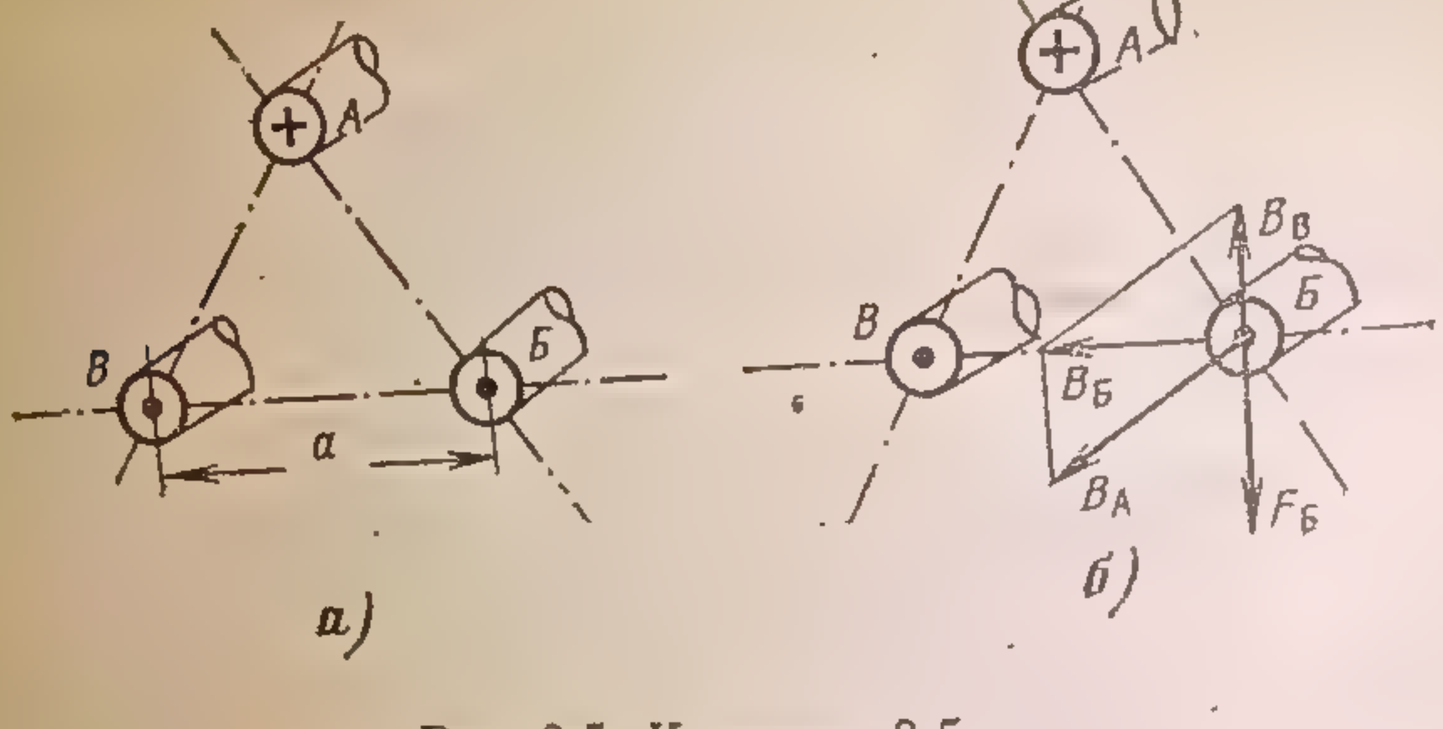
д) индуктивность катушки.

3-3. Два параллельных провода подвешены на изоляторах и находятся один от другого на расстоянии 50 см. Расстояние между соседними изоляторами 200 м. По проводам проходит ток 500 А. Определить силу, действующую на каждый изолятор.

3-4. Двухжильный кабель с бумажной изоляцией имеет свинцовую оболочку, предохраняющую кабель от попадания влаги (рис. 3-4). Расстояние между центрами сечений жил $a = 20$ мм. Определить силу взаимодействия токов, текущих в противоположных направлениях по жилам кабеля, на каждый метр длины кабеля и влияние этой силы на свинцовую оболочку. Ток в жилах кабеля $I =$

=500 А. Определить также, как изменится сила взаимодействия, если ток в жилах кабеля увеличится в 4 раза.

3-5. Три провода линии электропередачи расположены так, что образуют равносторонний треугольник (рис. 3-5, *а*). Расстояние между центрами сечения проводов $a=20$ см. По проводу $А$ проходит ток $I_А=100$ А, по проводам $Б$ и $В$ — токи $I_Б=I_В=50$ А, направленные, как показано на рис. 3-5. Определить магнитную индукцию в центре сечения каждого из проводов $B_А$, $B_Б$, $B_В$. По вычисленным индукциям определить силы, действующие на 1 км длины каждого из проводов $F_А$, $F_Б$, $F_В$.



а) б)

Рис. 3-5. К задаче 3-5.

Указание. В центре сечения каждого из проводов вектор магнитной индукции определяется как сумма векторов индукций от токов двух других проводов. Соответствующее построение в центре сечения провода $Б$ выполнено на рис. 3-5, *б*. Сила, действующая на этот провод, определится по формуле $F_Б = B_Б I_Б l$, а направление ее — правилом левой руки. Аналогичные построения нужно выполнить для двух других проводов и, исходя из этих построений, определить индукцию в центре сечения каждого провода и действующую на этот провод силу.

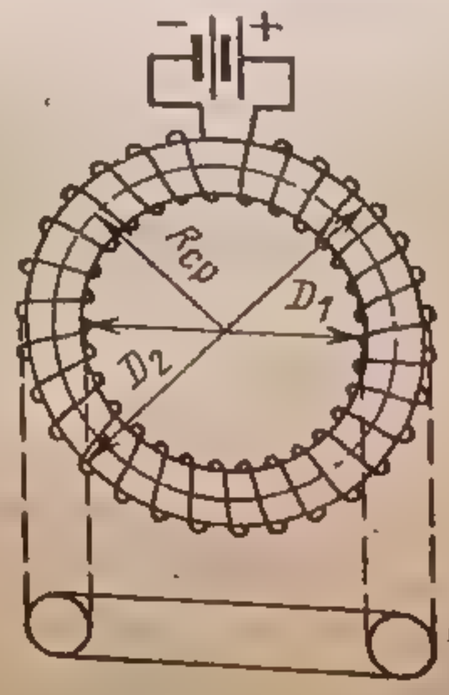


Рис. 3-6. К задаче 3-6.

3-6. Определить магнитный поток и индуктивность кольцевой катушки круглого сечения (рис. 3-6), имеющей размеры $D_1=300$ мм, $D_2=400$ мм при токе $I=10$ А. Число витков катушки $w=1000$.

3-7. На эбонитовый кольцевой каркас квадратного сечения нужно намотать катушку, чтобы индуктивность ее была равна 5 мГ. Радиус внутренней окружности кольца $R_1=26$ см, радиус наружной окружности $R_2=30$ см. Определить, сколько витков провода должно быть намотано. Определить также напряженность магнитного поля, магнитную индукцию и магнитный поток кольцевой катушки при токе в ней, равном 4 А.

3-2. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ВЕЩЕСТВА И ИХ НАМАГНИЧИВАНИЕ. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ И ЕЕ РАСЧЕТ

3-8*. По катушке, состоящей из 5000 витков провода, проходит ток I. Каркас катушки кольцевой, имеет прямоугольное сечение площадью $S=22$ см^2. Длина катушки по средней линии $l_{ср}=138$ см.

Условие 1. Ток в катушке $I=2$ А. Витки катушки равномерно распределены по всему кольцевому каркасу (рис. 3-7). Считая магнитное поле внутри катушки однородным, определить напряженность магнитного поля, магнитную индукцию, магнитный поток и индуктивность катушки для двух случаев: а) каркас катушки выполнен из эбонита; б) в каркас катушки введен магнитопровод из стали марки 1211 (Э11).

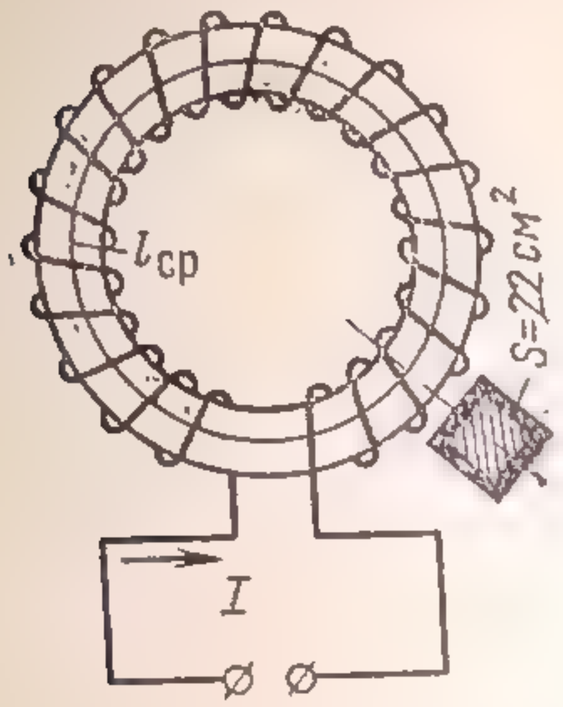


Рис. 3-7. К задаче 3-8.

Анализ и решение

Случай а. Каркас катушки выполнен из эбонита.

Напряженность магнитного поля во внутренней полости катушки выразится:

$$H=\frac{I\omega}{l_{ср}}=\frac{2\cdot 5000}{1{,}38}=7250\ \text{А/м}.$$

Магнитная индукция

$$B=\mu_0 H=1{,}256\cdot 10^{-6}\cdot 7250=91\cdot 10^{-4}\ \text{Т}.$$

Для эбонитового каркаса абсолютная магнитная проницаемость равна магнитной постоянной, т. е. практически такая же, как для вакуума.

Таким образом,

$$\mu_a=\mu_0=1{,}256\cdot 10^{-6}\ \text{Г/м}.$$

Магнитный поток сквозь площадь витка катушки

$$\Phi=BS=91\cdot 10^{-4}\cdot 22\cdot 10^{-4}=2000\cdot 10^{-8}\ \text{Вб}.$$

Индуктивность катушки определяется отношением магнитного потокосцепления к току

$$L=\frac{\omega\Phi}{I}=\frac{5000\cdot 2000\cdot 10^{-8}}{2}=0{,}05\ \text{Г}.$$

Случай б. Магнитопровод выполнен из стали марки 1211 (Э11). Напряженность магнитного поля не зависит от наличия магнитопровода, поэтому она выразится так же, как в случае «а»:

$$H=\frac{I\omega}{l_{ср}}=\frac{2\cdot 5000}{1{,}38}=7250\ \text{А/м}.$$

Зависимость B от H для стали является нелинейной, и абсолютная магнитная проницаемость стали — переменная. Поэтому магнит-

ную индукцию нельзя определить по формуле $B=\mu_a H$. Для определения ее нужно воспользоваться характеристиками намагничивания стали, заданными в виде кривых намагничивания или в виде таблиц (приложение 7). Для электротехнической стали 1211 напряженности магнитного поля 7250 А/м соответствует магнитная индукция примерно 7,68 Т.

При этом магнитный поток катушки выразится

$$\Phi = BS = 1{,}68 \cdot 22 \cdot 10^{-4} = 370\,000 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}.$$

Сравнение со случаем «а» задачи по условию 1 показывает, что магнитный поток здесь при прочих равных условиях значительно превышает поток в катушке с неферромагнитным каркасом.

Это объясняется тем, что в катушке со стальным магнитопроводом магнитное поле создается не только за счет тока в катушке, но и за счет собственного намагничивания стали:

$$L = \frac{\omega\Phi}{I} = \frac{5000 \cdot 370\,000 \cdot 10^{-8}}{2} = 9{,}25 \text{ Г}.$$

Для определения индуктивности пользоваться формулой (1), приведенной в решении задачи 3-2, можно только в тех случаях, когда известна абсолютная магнитная проницаемость среды μ_a. Для стали μ_a зависит от степени намагниченности, поэтому индуктивность катушки со стальным магнитопроводом, которая тоже, очевидно, будет непостоянной, нужно определять как отношение магнитного потокосцепления к току.

Вычисленная выше индуктивность катушки со стальным магнитопроводом имеет значение 9,25 Г только при данном токе. При другом токе индуктивность будет иметь другое значение.

Аналогично тому, как мы определили при данном токе индуктивность катушки со стальным магнитопроводом, можно определить при данном токе относительную магнитную проницаемость стали

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1{,}68}{1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 7250} = 185.$$

Таким образом, в этом частном случае абсолютная магнитная проницаемость стали в 185 раз больше, чем вакуума.

Условие 2. Ток в катушке $I=2$ А. Каркас катушки — кольцевой, витки катушки равномерно распределены на $^1/_3$ длины каркаса. Считая магнитное поле внутри катушки равномерным, определить напряженность магнитного поля, магнитную индукцию, магнитный поток и индуктивность катушки. Определить также относительную магнитную проницаемость стали магнитопровода. Задачу решить для двух случаев: а) каркас катушки выполнен из эбонита; б) в каркас введен магнитопровод из стали 1211 (Э11).

Анализ и решение

Случай а. Каркас катушки выполнен из эбонита (рис. 3-8). Абсолютная магнитная проницаемость эбонита такая же, как воздуха, поэтому линии магнитного поля будут замыкаться не по всему телу каркаса, а как показано на рис. 3-8, и расчет магнитной цепи нужно производить по тем же приближенным формулам, что

и для прямой катушки конечной длины. Поэтому напряженность магнитного поля для этого случая определится по формуле

$$H = I\omega / l_к,$$

где $l_к$ — длина катушки. Таким образом,

$$H = \frac{I\omega}{l_к} = \frac{2 \cdot 5000}{1{,}38/3} = 3 \cdot 7250 = 21\,750 \text{ А/м}.$$

Магнитная индукция в средней части катушки на ее оси будет:

$$B = \mu_0 H = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 21\,750 = 3 \cdot 91 \cdot 10^{-4} = 273 \cdot 10^{-4} \text{ Т}.$$

Магнитный поток через площадь витка катушки

$$\Phi = BS = 273 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot 10^{-4} = 6000 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}.$$

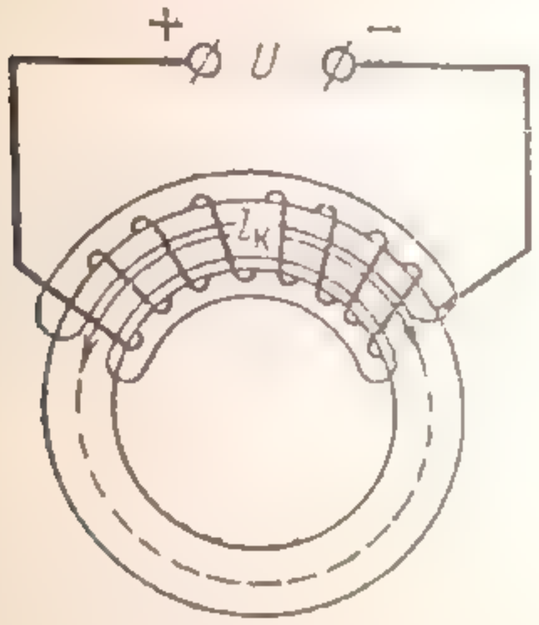


Рис. 3-8. К задаче 3-8.

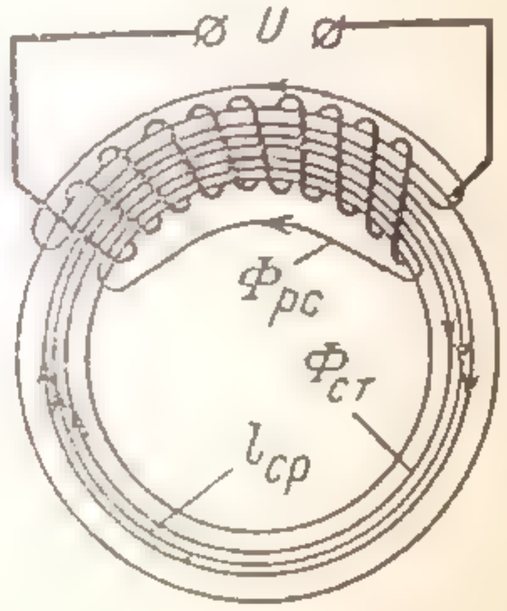


Рис. 3-9. К задаче 3-8.

Индуктивность катушки L может быть определена как отношение магнитного потокосцепления к току:

$$L = \frac{\omega\Phi}{I} = \frac{5000 \cdot 6000 \cdot 10^{-8}}{2} = 0{,}05 \cdot 3 = 0{,}15 \text{ Г}.$$

Полученная индуктивность значительно превышает ту, которая получилась для случая «а» задачи по условию 1. Это объясняется тем, что здесь мы имеем очень большую плотность намотки ($\omega/l_к$), 5000 витков приходится не на всю длину кольцевого каркаса, а только на $^1/_3$ ее.

Индуктивность в данном случае может быть определена и по формуле (1). Предоставляем это сделать самим учащимся. Результат должен быть одним и тем же.

Случай б. Магнитопровод катушки выполнен из стали 1211 (Э11) (рис. 3-9).

При наличии стального магнитопровода магнитное поле будет замыкаться по всему стальному магнитопроводу, независимо от того, распределяются ли витки катушки по всей длине магнитопровода (рис. 3-7) или по части его (рис. 3-9). Поэтому для данного случая, как и для случая «б» по условию 1, напряженность магнитного поля выразится одинаково: $H_{ст} = \frac{I\omega}{l_{ср}} = 7250$ А/м. Следовательно магнитная индукция, определяемая по характеристикам намагничивания

стали (приложение 7), и магнитный поток намагничивания стали останутся также неизменными, т. е. $B_{ст}=1{,}68$ Т и $\Phi=370\,000\times 10^{-8}$ Вб. Но теперь небольшая часть этого потока или так называемый поток рассеяния $\Phi_{рс}$, который создается только током в катушке, будет замыкаться через воздух (рис. 3-9). Этот поток определен в случае «а» данного условия:

$$\Phi_{рс}=6000\cdot 10^{-8}\ \text{Вб}.$$

Следовательно, магнитный поток, обусловленный намагничиванием стали, составит:

$$\Phi_{ст}=\Phi-\Phi_{рс}=370\,000\cdot 10^{-8}-6000\cdot 10^{-8}=364\,000\cdot 10^{-8}\ \text{Вб}.$$

По отношению к общему потоку поток рассеяния составляет:

$$\frac{\Phi_{рс}}{\Phi}100=\frac{6000\cdot 10^{-8}}{370\,000\cdot 10^{-8}}100=1{,}62\%.$$

По сравнению с катушкой, намотанной по всей длине стального магнитопровода, для катушки с обмоткой на $^1/_3$ длины магнитопровода магнитная проницаемость стали несколько уменьшится:

$$\mu_{ст}=\frac{B_{ст}}{\mu_0 H}=\frac{1{,}65}{1256\cdot 10^{-6}\cdot 7250}=185,$$

где

$$B_{ст}=\frac{\Phi_{ст}}{S}=\frac{364\,000\cdot 10^{-8}}{22\cdot 10^{-4}}=1{,}65\ \text{Т}.$$

Индуктивность катушки с учетом потока рассеяния останется неизменной:

$$L=\frac{w\Phi}{I}=\frac{5000\cdot 370\,000\cdot 10^{-8}}{2}=9{,}25\ \text{Г}.$$

Анализируя решение данной задачи, можно сделать следующие выводы: магнитный поток рассеяния увеличивается с уменьшением длины катушки, но он по сравнению с основным потоком, обусловленным намагничиванием стали, весьма мал. Следовательно, при наличии стального магнитопровода напряженность магнитного поля, магнитная индукция и магнитный поток практически не зависят от того, расположена ли катушка на всей длине или на части длины магнитопровода. Форма магнитопровода определяет расположение линий магнитного поля. В практике очень часто применяется магнитопровод прямоугольной формы (рис. 3-10). Такой магнитопровод проще в изготовлении, а расчет магнитной цепи его ничем не отличается от расчета магнитной цепи кольцевой катушки.

Условие 3. Прямоугольный магнитопровод катушки, выполненный из элетротехнической стали марки 1211 (Э11), имеет воздушный зазор $\delta=0{,}5$ см (рис. 3-11). Определить ток в катушке и индуктивность ее, если магнитный поток сквозь поперечное сечение сердечника $\Phi=370\,000\cdot 10^{-8}$ Вб.

Анализ и решение

Для однородной магнитной цепи с замкнутым стальным магнитопроводом (рис. 3-10)

$$\Phi = BS = \frac{\mu_{a.ст}\, I\omega}{l_{ср}} S.$$

Эту формулу можно преобразовать к виду $\Phi = \dfrac{I\omega}{l_{ср}/\mu_{a.ст} S}$. Она получила название формулы закона Ома для магнитной цепи по аналогии с электрической цепью.

Здесь $I\omega$ — м. д. с.; $l_{ср}/\mu_{a\ ст}S$ — магнитное сопротивление.

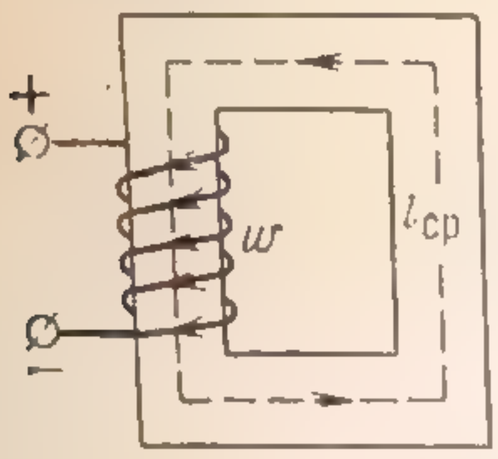


Рис. 3-10. К задачам 3-8, 3-9, 3-10.

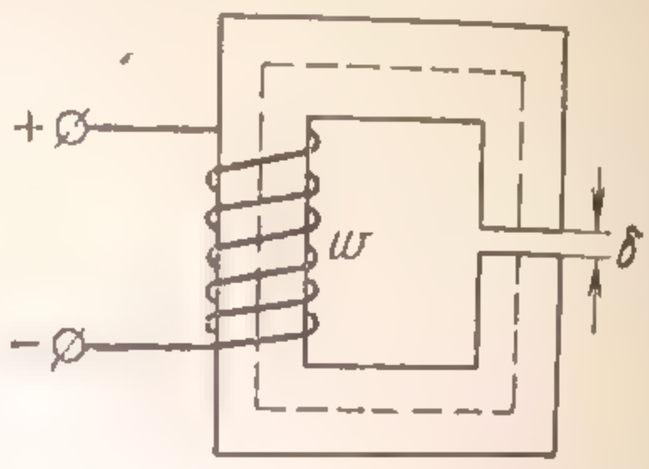


Рис. 3-11. К задачам 3-8, 3-10.

Неоднородную магнитную цепь (рис. 3-11) можно рассматривать как состоящую из двух (для данной задачи) последовательно соединенных участков магнитных сопротивлений. Поэтому

$$\Phi = \frac{I\omega}{\dfrac{l_{ст}}{\mu_{a.ст} S_{ст}} + \dfrac{l_\delta}{\mu_0 S_\delta}}.$$

Умножив обе части уравнения на знаменатель правой части и заменив Φ/S через B и B/μ_a через H, получим расчетное уравнение закона полного тока для данной магнитной цепи

$$I\omega = H_{ст}\, l_{ст} + H_\delta\, l_\delta^*.$$

Магнитный поток, заданный в условии 3, равен потоку, который получится в замкнутом стальном магнитопроводе без воздушного зазора при токе в катушке 2 А (условие 2, случай «б», рис. 3-9 и 3-10).

Как видно из уравнения закона Ома для магнитной цепи, воздушный зазор вызывает увеличение магнитного сопротивления, поэтому при неизменном токе магнитный поток должен был бы уменьшиться. Но по заданному условию задачи неизменным должен остаться магнитный поток, следовательно, ток в катушке нужно будет увеличить.

---

* В общем случае для неразветвленной магнитной цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных участков магнитных сопротивлений, различающихся сечением стали, материалом магнитопровода (рис. 3-12), уравнение закона полного тока получит вид:

$$I\omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \cdots + H_n l_n.$$

Для определения тока в катушке воспользуемся приведенным выше уравнением закона полного тока для данной магнитной цепи. Напряженности магнитного поля в стали $H_{ст}$ и в воздухе H_δ определятся, если будут известны соответствующие магнитные индукции.

Магнитная индукция в стали

$$B_{ст} = \frac{\Phi}{S_{ст}} = \frac{370\,000 \cdot 10^{-8}}{22 \cdot 10^{-4}} = 1{,}68 \text{ Т}.$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре будет такой же, как в стали, так как сечение воздушного слоя, прилегающего к стальному магнитопроводу, $S_\delta = S_{ст} = 22$ см^2.

Теперь легко определить напряженности магнитного поля. Для стали марки 1211 (Э11) по таблице приложения 7 путем интерполяции определим напряженность поля в стали, соответствующую данной магнитной индукции, $H_{ст} = 7250$ А/м.

Напряженность поля в воздухе определится по формуле

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{B_\delta}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 0{,}8 \cdot 10^6 B_\delta .$$

Следовательно,

$$H_\delta = 0{,}8 \cdot 1{,}68 \cdot 10^6 = 1\,342\,000 \text{ А/м}.$$

Теперь, подставляя числовые данные в уравнение закона полного тока, получаем:

$$Iw = 7250 \cdot 1{,}38 + 1\,342\,000 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2} = 16\,710 \text{ А}.$$

Отсюда ток в катушке

$$I = \frac{16\,710}{5000} = 3{,}35 \text{ А}.$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{5000 \cdot 370\,000 \cdot 10^{-8}}{3{,}35} = 5{,}53 \text{ Г}.$$

Условие 4. Прямоугольный магнитопровод катушки, выполненный из электротехнической стали марки 1211 (Э11), имеет воздушный зазор $\delta = 0{,}5$ см (рис. 3-11). Определить магнитный поток и индуктивность катушки, если ток в ней $I = 2$ А.

Анализ и решение

В решении задачи по условию 3 было выведено расчетное уравнение для данной магнитной цепи $Iw = H_{ст} l_{ст} + H_\delta l_\delta$.

Для данного условия расчетное уравнение содержит два неизвестных $H_{ст}$ и H_δ, для определения которых нужно знать магнитный поток, что составляет конечную цель данной задачи.

На первый взгляд создается впечатление, что мы имеем одно уравнение с двумя неизвестными, которое допускает бесчисленное множество решений. Но в действительности мы располагаем и вторым уравнением, которое лишь задано не в аналитической форме,

и вид графика — кривой намагничивания (или таблицы), устанавливающей связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в стали магнитопровода (приложение 7). Поэтому данная задача имеет одно решение, получить которое можно либо методом подбора, либо методом построения магнитной характеристики. Выразим графически зависимость магнитного потока от тока в намагничивающей катушке $\Phi = f(I)$. Эта зависимость называется *магнитной характеристикой цепи.*

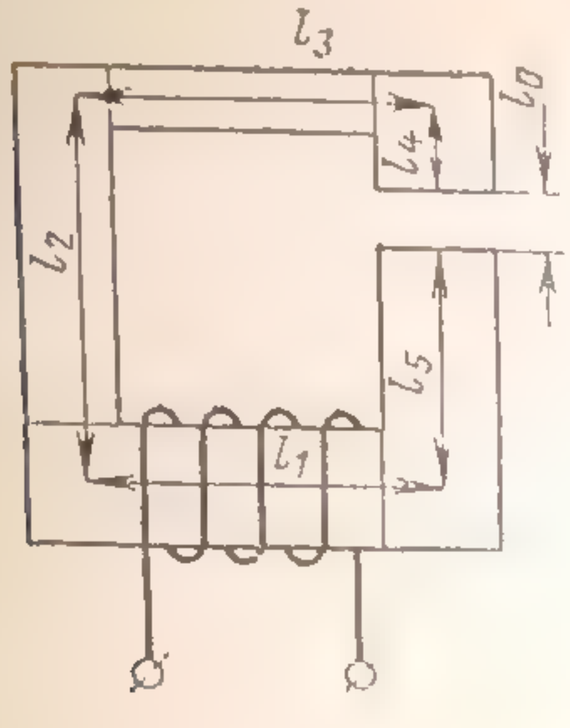


Рис. 3-12. К задачам 3-8, 3-11.

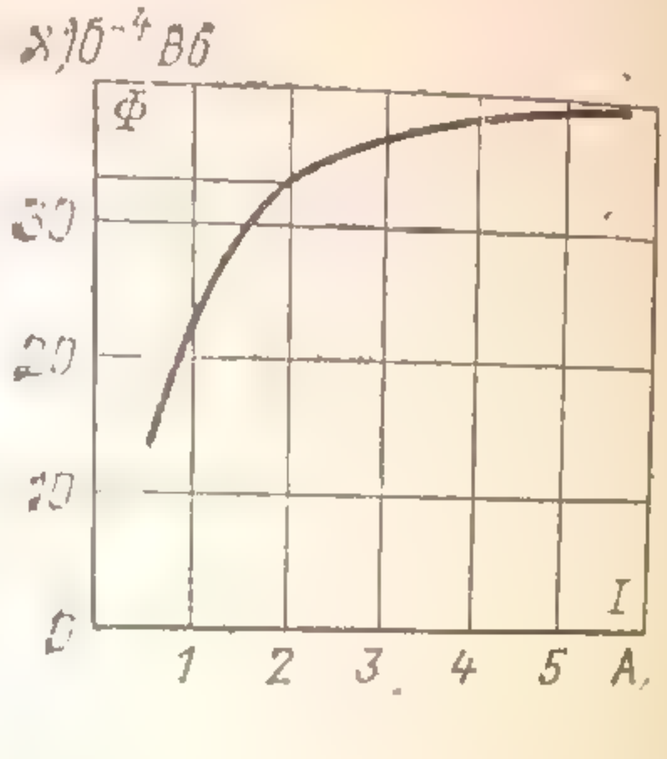


Рис. 3-13. К задаче 3-8.

Для построения магнитной характеристики зададимся произвольно рядом значений магнитного потока. Для каждого значения магнитного потока определим:

$$B_{ст} = B_\delta = \Phi / S.$$

Далее по характеристике намагничивания для стали марки Э11 (приложение 7) определим $H_{ст}$. Напряженность поля в воздухе определим по формуле $H_\delta = 0{,}8\, B_\delta \cdot 10^6$ А/м (см. решение задачи по условию 3). Затем из формулы закона полного тока определим ток

$$I = \frac{H_{от}\, l_{ст} + H_\delta\, l_\delta}{w}.$$

Данные расчетов сведены в таблицу и по ним построена магнитная характеристика (рис. 3-13).

Сводная таблица данных расчета магнитной цепи

Ф, Вб	$B_{ст} = B_\delta$, Т	$H_{от}$, А/м	H_δ, А/м	Iw, А	I, А
$20 \cdot 10^{-4}$	0,91	400	$0{,}73 \cdot 10^6$	4200	0,84
$25 \cdot 10^{-4}$	1,14	739	$0{,}91 \cdot 10^6$	5570	1,11
$30 \cdot 10^{-4}$	1,37	1340	$1{,}1 \cdot 10^6$	7350	1,47
$37 \cdot 10^{-4}$	1,68	7250	$1{,}342 \cdot 10^6$	16 710	3,35
$40 \cdot 10^{-4}$	1,82	14 350	$1{,}46 \cdot 10^6$	27 100	5,43

По характеристике току 2 А соответствует приблизительно магнитный поток $\Phi = 335\,000 \cdot 10^{-8}$ Вб.

Индуктивность цепи в этом случае выразится:

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{5000 \cdot 335\,000 \cdot 10^{-8}}{2} = 8{,}4 \text{ Г}.$$

Пользуясь построенной магнитной характеристикой, можно также определить магнитный поток при любом другом токе.

Вопросы и упражнения к задаче 3-8

1. В катушке, витки которой равномерно распределены по кольцевому каркасу (рис. 3-7) при токе $I=10$ А, напряженность поля $H=1000$ А/м, сечение катушки $S=20$ см^2. Определить магнитную индукцию и магнитный поток для случаев:

а) каркас катушки выполнен из эбонита;

б) в каркас катушки введен магнитопровод из стали марки Э42.

Определить, как изменятся магнитная проницаемость и индуктивность катушки при введении в каркас стального магнитопровода.

2. Решить предыдущую задачу для катушки, расположенной на половине длины кольцевого каркаса (рис. 3-9).

3. В катушке с магнитопроводом из стали марки 1512 (Э42) при некотором токе напряженность поля $H=63$ А/м. Определить, как изменятся магнитная индукция, магнитный поток, магнитная проницаемость стали и индуктивность катушки, если ток увеличить соответственно в 2 и в 3 раза.

4. Как изменится магнитный поток электромагнита, если в его стальном магнитопроводе выпилить воздушный зазор, а ток в катушке оставить неизменным?

5. Что нужно сделать для того, чтобы магнитный поток остался неизменным, если в стальном магнитопроводе катушки выпилить воздушный зазор?

6. Для магнитной цепи (рис. 3-11) магнитная характеристика представлена на рис. 3-13. При токе 2 А индуктивность цепи $L=4$ Г. Определить число витков катушки. Определить также индуктивность цепи при уменьшении и при увеличении тока в 2 раза.

7. При одинаковой плотности намотки $w/l_к=5$ витков/см магнитная индукция 1,35 Т получается при разных токах в катушке в зависимости от материала магнитопровода согласно таблице приложения 7. Укажите, при каком материале магнитопровода для получения заданной индукции требуется ток 1; 2; 2,7; 3,6 А.

3-9. Катушка с замкнутым каркасом (рис. 3-10) имеет 800 витков. Длина каркаса по средней линии $l_{ср}=0{,}5$ м, длина катушки $l_к=15$ см, площадь поперечного сечения каркаса $S=25$ см^2.

Условие 1. Определить магнитную индукцию, магнитный поток и индуктивность катушки при токах $I_1=2{,}5$ А и $I_2=5$ А для двух случаев:

а) каркас катушки выполнен из неферромагнитного материала;

б) в каркас катушки введен магнитопровод из электротехнической стали марки 1211 (Э11).

Условие 2. Магнитопровод катушки выполнен из электротехнической стали марки 1211 (Э11). При токах в катушке 2,5 и 5 А определить магнитный поток, обусловленный собственным намагничиванием стали $\Phi_{ст}$, поток рассеяния $\Phi_{рс}$ и магнитную проницаемость стали.

3-10. По катушке с замкнутым магнитопроводом из электротехнической стали марки 1211 (Э11) (рис. 3-10) протекает ток 5 А. Число витков катушки $w=800$, средняя длина магнитной цепи $l_{ср}=0{,}5$ м, сечение магнитопровода $S=25$ см^2.

Условие 1. Определить, как нужно изменить ток в катушке, чтобы при наличии воздушного зазора $\delta=0{,}5$ см (рис. 3-11) сохранить магнитный поток неизменным.

Условие 2. Определить, как изменится магнитный поток при наличии воздушного зазора $\delta=0{,}5$ см (рис. 3-11) и неизменном токе в катушке.

Указание. Задачу по условию 2 следует решать методом подбора или построения магнитной характеристики.

3-11. Магнитопровод электромагнита (рис. 3-12) собран из пяти частей, изготовленных из электротехнической стали марки 1512 (Э42).

Длины участков магнитной цепи: $l_1=l_3=80$ мм, $l_2=100$ мм, $l_4=40$ мм, $l_5=55$ мм. Сечения участков: $S_1=10$ см^2, $S_2=8$ см^2, $S_3=4$ см^2, $S_4=S_5=9$ см^2.

Определить, при каком токе в катушке, имеющей 1000 витков, магнитный поток будет равен $7\cdot10^{-4}$ Вб. Задачу решить для двух случаев: а) $l_4=40$ мм, $l_5=55$ мм ($\delta=5$ мм); б) $l_4=40$ мм, $l_5=60$ мм, ($\delta=0$).

3-12*. Контактор — аппарат для производства переключений в электрических цепях (рис. 3-14, *а*) имеет электромагнит (рис. 3-14, *б*) в виде неподвижного стального сердечника C с намагничивающей катушкой K и подвижного стального якоря $Я$, перемещение которого вызывает переключение замыкающих электрических контактов $ЗК$. При отсутствии тока в катушке контактора якорь под действием силы тяжести или пружин отделен от сердечника воздушным зазором и немагнитной прокладкой.

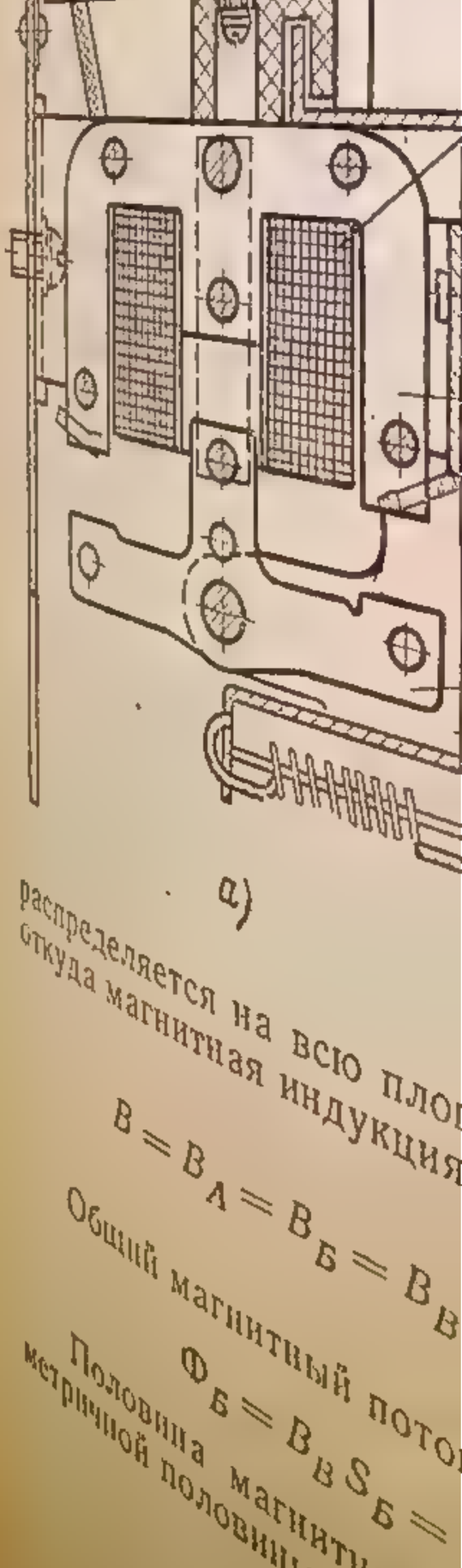
Размеры магнитной цепи контактора: $a=140$ мм, $b=75$ мм, $c=10$ мм, $d=40$ мм. Ток в катушке контактора $I=0{,}5$ А. В нерабочем состоянии, когда ток в катушке равен нулю, зазор между сталью полюсов контактора $\delta=5$ мм, в рабочем состоянии полюсы полностью не замыкаются вследствие наличия между ними немагнитной прокладки толщиной $\delta_{пр}=1$ мм, предохраняющей полюсы от смятия и прилипания. Материал сердечника и якоря — электротехническая сталь 1211 (Э11). В рабочем состоянии при втянутом сердечнике сила тяги электромагнита (конечная) $F_к=18{,}8$ кгс. Определить число витков катушки контактора, начальную силу тяги $F_н$ в момент включения катушки в сеть, сечение, длину и сопротивление провода катушки, если допустимая по условиям нагрева плотность тока в ней не должна превышать 2,5 А/мм^2. Определить также падение напряжения в катушке.

Анализ и решение

Сила тяги электромагнита (наименьшая сила, при которой подвижная часть электромагнита может быть оторвана от неподвижной) определяется из выражения $F=4\cdot10^5\,B^2S$, где F — сила тяги электромагнита, Н; B — магнитная индукция под полюсом, Т; S — сечение полюса, примыкающего к зазору, м^2.

Магнитная цепь данного электромагнита является разветвленной, т. е. магнитное поле из стержня $Б$ разветвляется симметрично по стержням A и B. Разделив магнитную цепь по оси симметрии на две части, расчет будем производить для половины полного магнит-

вого потока Ф. [illegible]
стержня Б. Штриховая
поле этого потока Ф.
Площадь полюса пол
$=2$ см$^2=2\cdot10^{-4}$ м^2, $S_Б$
всех полюсов $S=S_A+S_Б$
ловии задачи тяговая сил

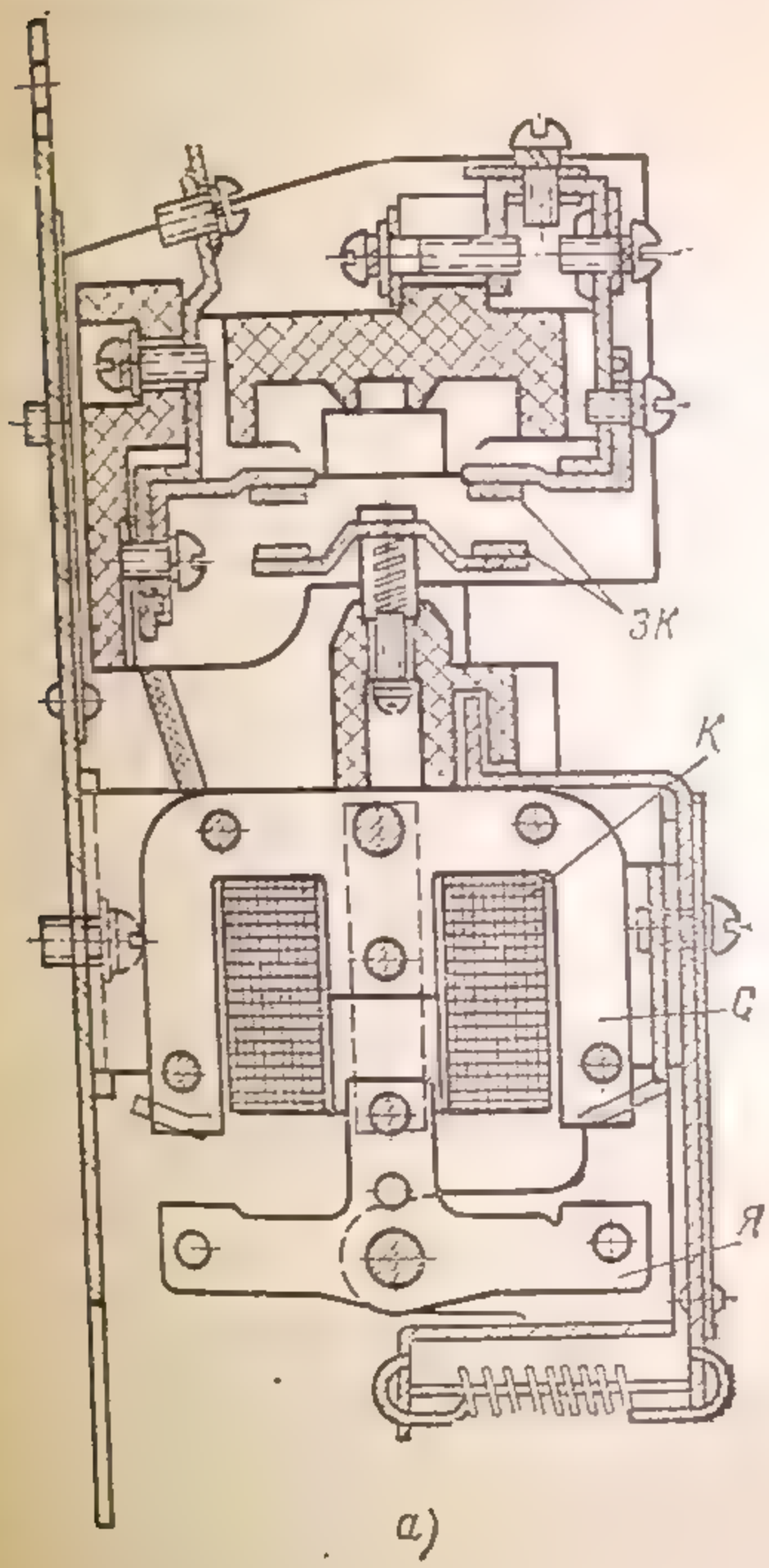


а)

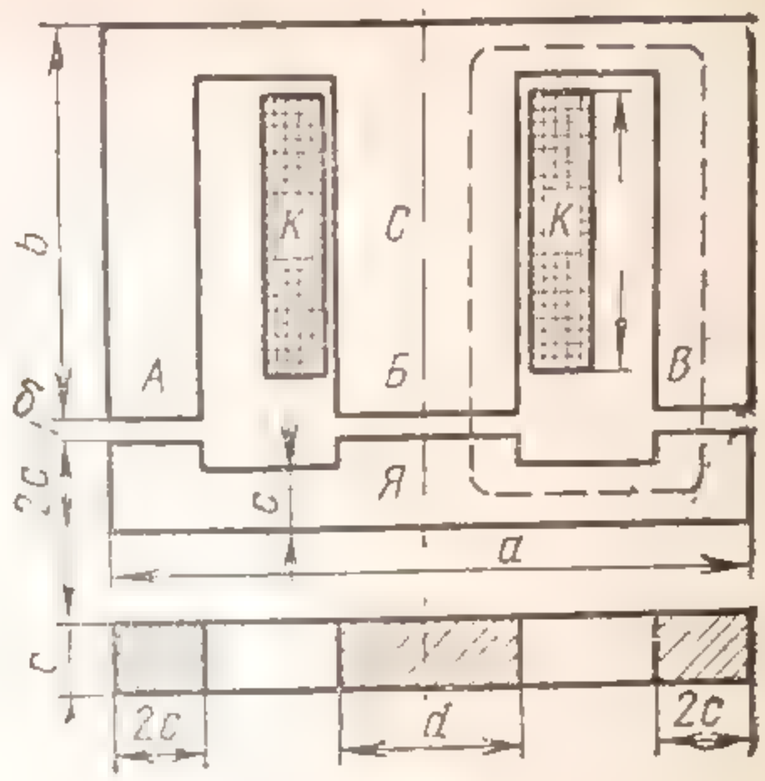
Распределяется на всю пло
откуда магнитная ин
$B=B_A=B_Б=B_B$
Общий магнитный пото
$Ф_Б=B_B S_Б=$
Половина магнитного
метричной половины магнит

ного потока Ф, проходящего через поперечное сечение среднего стержня Б. Штриховая линия на рис. 3-14 показывает магнитное поле этого потока Ф.

Площадь полюса под каждым из стержней $S_A = S_B = 2 \cdot c^2 = 2$ см$^2 = 2 \cdot 10^{-4}$ м^2, $S_Б = dc = 4$ см$^2 = 4 \cdot 10^{-4}$ м^2. Общая площадь всех полюсов $S = S_A + S_Б + S_B = 8$ см$^2 = 8 \cdot 10^{-4}$ м. Заданная в условии задачи тяговая сила электромагнита $F_к = 18{,}8$ кгс $= 192$ Н



а)



б)

Рис. 3-14. К задаче 3-12.

распределяется на всю площадь полюсов, т. е. $192 = 4 \cdot 10^5 \, B^2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}$, откуда магнитная индукция под каждым полюсом

$$B = B_A = B_Б = B_B = \sqrt{\frac{192}{4 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^{-4}}} = 0{,}775 \text{ Т}.$$

Общий магнитный поток среднего стержня

$$\Phi_Б = B_B S_Б = 0{,}775 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 3{,}1 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Половина магнитного потока или поток неразветвленной симметричной половины магнитной цепи

$$\Phi_Б / 2 = 1{,}55 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Разобьем магнитную цепь на однородные участки с одинаковой магнитной индукцией и из одного и того же материала. Такими участками будут: прокладные участки в стальном сердечнике и якоре с индукцией $B_1 = B_Б = B_Б = 0{,}775$ Т. Общая длина этих участков (рис. 3-14) $l_1 = \left(b + 2c - \frac{c}{2} - \frac{c}{2}\right) 2 = 170$ мм $= 0{,}17$ м, поперечные участки в стальном сердечнике и якоре с индукцией

$$B_2 = \frac{\Phi_Б}{2S_а} = \frac{1{,}55 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}} = 1{,}55 \text{ Т}.$$

Общая длина поперечных участков

$$l_2 = \left(\frac{a}{2} + c - \frac{d}{4}\right) \cdot 2 = 100 \text{ мм} = 0{,}1 \text{ м}.$$

Два зазора между полюсами с индукцией $B_1 = 0{,}775$ Т. Общая длина двух зазоров $l_\delta = 2\delta = 2$ мм $= 0{,}002$ м.

Для каждого из участков определим напряженность магнитного поля. В таблице приложения 7 напряженность поля в стали марки 1211 (Э11) для 0,75 Т — 287 А/м и для 0,8 Т — 318 А/м. На малых участках кривой намагничивания индукцию можно считать пропорциональной напряженности магнитного поля. Поэтому для индукции $B_1 = \frac{0{,}75 + 0{,}8}{2} = 0{,}775$ Т напряженность поля можно принять $H_1 = \frac{287 + 318}{2} = 302$ А/м (метод интерполяции). Для индукции $B_2 = 1{,}55$ Т $H_2 = 3280$ А/м (приложение 7). Для немагнитных участков

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{B_\delta}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 0{,}8 \cdot 10^6 B_\delta =$$

$$= 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 0{,}775 = 0{,}618 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

Теперь для расчета магнитной цепи можно воспользоваться уравнением закона полного тока

$$I\omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta l_\delta .$$

Подставляя значения величин, получаем:

$$I\omega = 302 \cdot 0{,}17 + 3280 \cdot 0{,}1 + 0{,}618 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1615 \text{ А}.$$

При токе в катушке 0,5 А число витков катушки

$$\omega = \frac{(I\omega)}{I} = \frac{1615}{0{,}5} = 3230.$$

При включении катушки контактора под напряжение начальный зазор между сталью полюсов $\delta_1 = 5$ мм. При неизменной м. д. с. (полном токе) задаемся различными значениями магнитной индукции под средним и крайним стержнями, в результате чего устанавливаем, что при $B_1 = B_Б = B_В = 0{,}2$ Т, $B_2 = 0{,}4$ Т, $H_1 = 87$ А/м, $H_2 = 140$ А/м (приложение 7), $H_\delta = 0{,}8 B_1 \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}2 \cdot 10^6 = 0{,}16 \times 10^6$ А/м полный ток $I\omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta l_\delta = 87 \cdot 0{,}17 + 140 \cdot 0{,}1 + 0{,}16 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 14{,}8 + 14 + 1600 = 1628{,}8$ А, что практически совпадает с полученным ранее полным током 1615 А (ошибка ме-

нее [см.]. Отсюда начальное усилие, действующее на подвижную часть электромагнита,

$$F_н = 4 \cdot 10^5 B^2 S = 4 \cdot 10^5 \cdot 0{,}2^2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 12{,}8 \text{ Н}.$$

Исходя из того, что допускаемая по условиям нагрева плотность тока не должна превышать 2,5 А/мм², определим необходимое сечение провода катушки электромагнита

$$S_{пров} = \frac{I}{2{,}5} = \frac{0{,}5}{2{,}5} = 0{,}2 \text{ мм}^2.$$

Из формулы $S_{пров} = \pi d^2_{пров}/4$ определим диаметр провода

$$d_{пров} = \sqrt{\frac{4S_{пров}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}2}{\pi}} \approx 0{,}5 \text{ мм}.$$

С учетом эмалевой изоляции примем $d_{пров} = 0{,}55$ мм. Высота катушки $h = 55$ мм (рис. 3-14). Следовательно, по высоте катушки уложатся $h/d_{пров} = 55/0{,}55 = 100$ витков, а вся катушка должна быть намотана в $w/100 = 3230/100 = 32{,}3$ слоя.

Наименьшая длина витка по периметру среднего стержня $l'_в = 40 \cdot 2 + 10 \cdot 2 = 100$ мм. Наибольшая длина витка с учетом толщины катушки, намотанной в 32,3 слоя, $l''_в = (40 + 0{,}55 \cdot 32{,}3 \cdot 2)2 + (10 + 32{,}3 \cdot 2)2 = 241{,}6$ мм. Средняя длина витка $l_{в.ср} = \frac{100 + 241{,}6}{2} = 170{,}8$ мм. Общая длина провода $l = l_{ср} w = 170{,}8 \cdot 3230 \cdot 10^{-3} = 550$ м. Сопротивление катушки, намотанной из медного провода сечением $S_{пров} = 0{,}2$ мм²,

$$r_к = \frac{1}{\gamma S_{пров}} = \frac{550}{57 \cdot 10^6 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-6}} = 48{,}4 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения в катушке $U_к = I r_к = 0{,}5 \cdot 48{,}4 = 24{,}2$ В.

Вопросы и упражнения к задаче 3-12

1. Контактор, магнитная цепь которого представлена на рис. 3-14, *б*, имеет размеры $d = 2c = 20$ мм. Определить тяговую силу электромагнита для двух случаев: а) индукция под крайним стержнем $B_в = 0{,}775$ Т; б) индукция под средним стержнем $B_б = 0{,}775$ Т.

2. Определить начальную силу тяги электромагнита $F_н$ при $\delta_1 = 5$ мм и конечную $F_к$ при $\delta_2 = 1$ мм, если Ш-образный электромагнит в условиях задачи 3-12 заменить П-образным (рис. 3-15), магнитная цепь которого является симметричной половиной магнитной цепи, показанной на рис. 3-14, *б* ($d/2 = 2c$).

3. Для П-образного электромагнита (рис. 3-15), магнитная цепь которого является симметричной половиной магнитной цепи, изображенной на рис. 3-14, *б*, дано: начальная сила тяги 9,6 Н при $\delta_1 = 5$ мм, конечная сила тяги 6,4 Н при $\delta_2 = 1$ мм. Определить в обоих случаях магнитную индукцию на всех участках магнитной цепи, размеры которой заданы в условии задачи 3-12.

4. Для магнитной цепи (рис. 3-14, *б*) индукция в среднем стержне $B_б = 0{,}5$ Т, площади среднего и крайних стержней заданы для

следующих четырех случаев: а) $S_Б=4$ см², $S_A=S_B=4$ см²; б) $S_Б=8$ см²; $S_A=S_B=4$ см²; в) $S_Б=4$ см², $S_A=S_B=2$ см²; г) $S_Б=8$ см², $S_A=S_B=8$ см². Определить, в каком случае тяговая сила электромагнита будет 160, 120, 80, 60 Н.

3-13. Электромагнит, схематически изображенный на рис. 3-16, имеет размеры: средняя длина по сердечнику $l_1=170$ мм, сечение сердечника $S_1=2$ см², средняя длина по якорю $l_2=100$ мм, сечение якоря 1 см², материал сердечника и якоря — мягкая кованая сталь Ст.2.

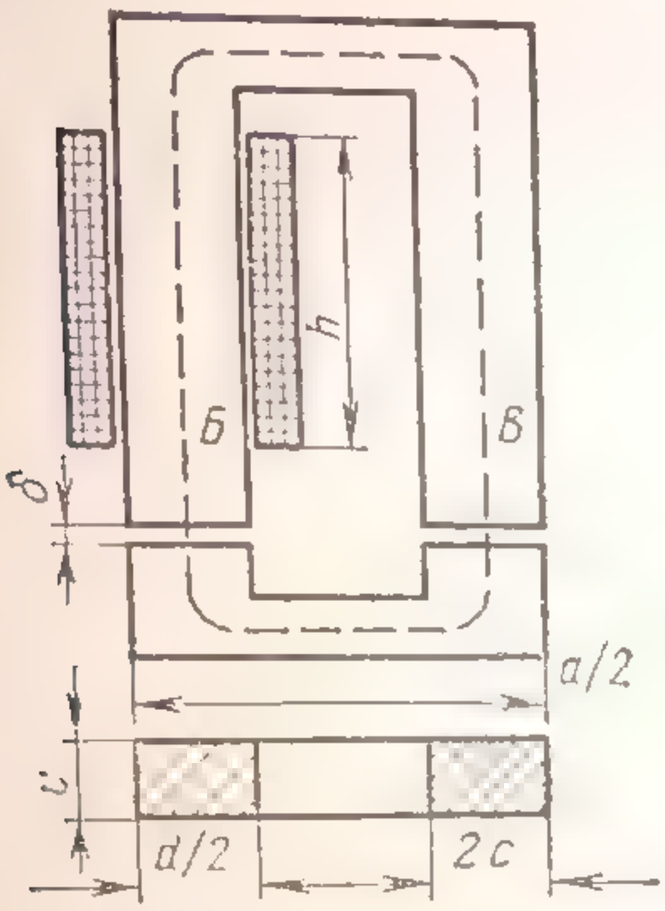


Рис. 3-15. К задаче 3-12.

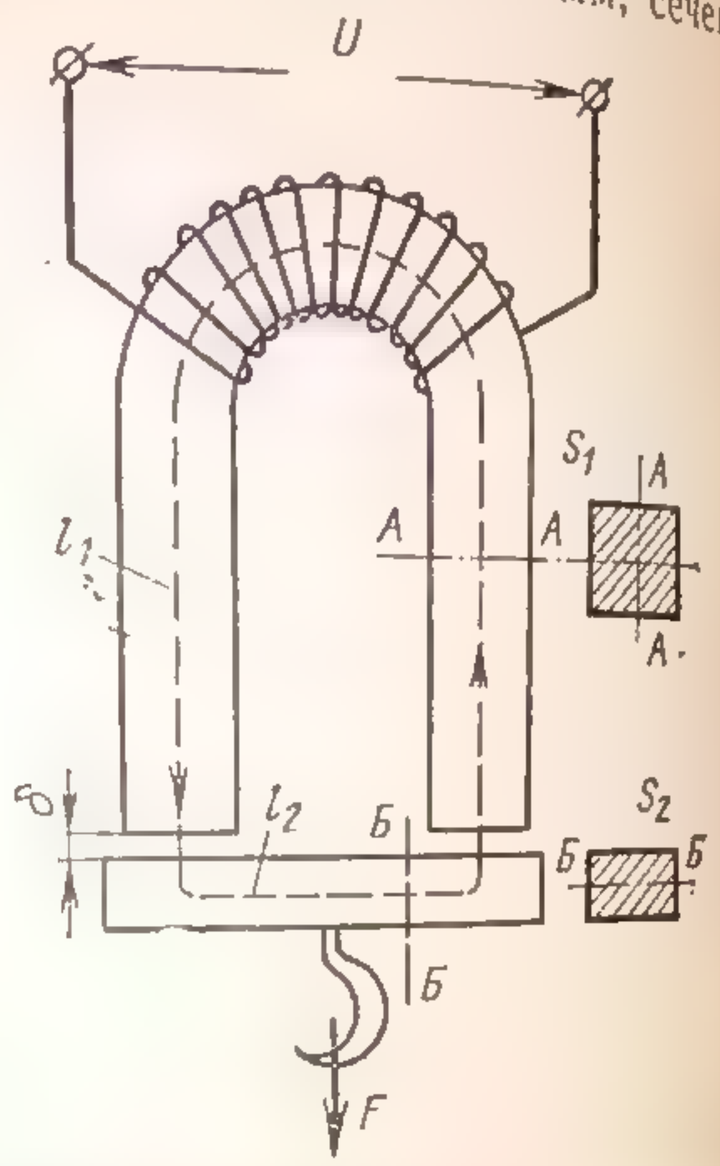


Рис. 3-16. К задачам 3-13, 3-14.

В момент включения катушки электромагнита под напряжение воздушный зазор $\delta_1=5$ мм и тяговая сила электромагнита $F_1=1{,}6$ Н.

Условие 1. Определить ток в катушке электромагнита, если число витков ее $w=1000$. Определить также длину провода, потребного для намотки катушки, если диаметр провода с изоляцией $d=0{,}7$ мм, длина катушки $l_к=70$ мм и каркас, на который намотана катушка, имеет квадратное сечение, равное сечению сердечника электромагнита S_1.

Условие 2. Определить тяговую силу электромагнита, если при неизменном токе в катушке сердечник приблизить к якорю на расстояние $\delta_2=1$ мм.

3-14. Электромагнит (рис. 3-16) с числом витков катушки $w=400$ имеет следующие данные. Сечение сердечника $S_1=156$ см², сечение якоря $S_2=104$ см², длина средней линии по сердечнику $l=50$ см, длина средней линии по якорю $l_2=20$ см, длина воздушного зазора у каждого полюса δ, материал сердечника и якоря — электротехническая сталь марки 1211 (Э11).

Условие 1. Рассчитать, каким должен быть ток в катушке, чтобы тяговая сила электромагнита была равна F (на один полюс $F/2$). Значения тяговой силы F следующие: 2000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000 Н.

Задачу решить для двух случаев: а) воздушный зазор между якорем и сердечником $\delta = 0{,}1$ см; б) якорь плотно прилегает к сердечнику $\delta = 0$.

Условие 2. Определить, как изменится тяговая сила электромагнита, если при неизменном токе в катушке, рассчитанном по условию 1 с воздушным зазором $\delta = 0{,}1$ см, якорь вплотную будет прилегать к сердечнику ($\delta = 0$).

3-3. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ВЗАИМНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

3-15*. В равномерном магнитном поле с индукцией $B = 1$ Т по двум направляющим перемещается провод длиной $l = 2$ м со скоростью $v = 10$ м/с (рис. 3-17, *а* и *б*). Движение провода происходит под действием посторонней силы F (генераторный режим). Сопротивление провода (внутреннее сопротивление генератора) $r_0 = 0{,}5$ Ом, внешнее сопротивление r (сопротивление потребителя), присоединенное к направляющим, равно 4,5 Ом. Линии магнитного поля показаны на схемах (рис. 3-17) точками и направлены из-за плоскости чертежа к наблюдателю.

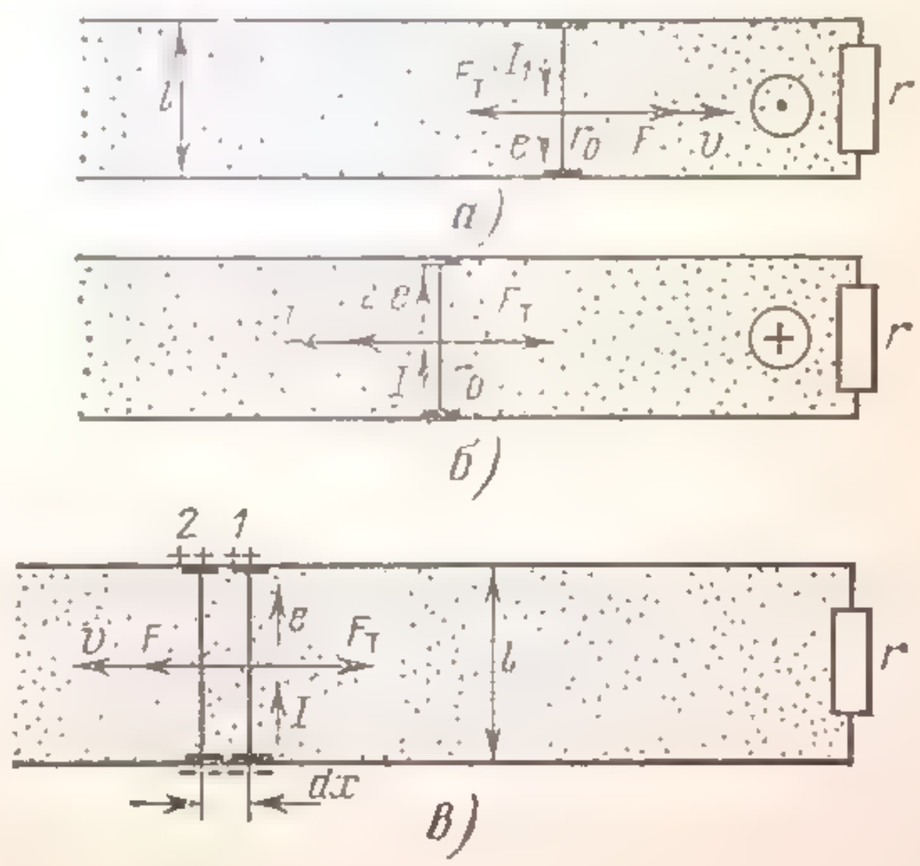


Рис. 3-17. К задачам 3-15, 3-17.

Пренебрегая сопротивлением направляющих, определить э. д. с. индукции E, ток I, электромагнитную силу F и составить уравнение баланса мощностей. Определить также напряжение во внешней цепи.

Анализ и решение

Под действием посторонней силы F провод может двигаться вправо или влево, перерезая линии магнитного поля. При этом в нем индуктируется э. д. с. E. Так как при генераторном режиме цепь замкнута через внешнее сопротивление r, по проводу будет протекать ток $I = \dfrac{E}{r_0 + r}$, где r_0 — сопротивление провода, являющееся внутренним сопротивлением генератора. Сопротивлением направляющих пренебрегаем.

Из закона о сохранении энергии следует, что процессу преобразования механической энергии в электрическую сопутствует противодействие, которое испытывает источник энергии со стороны потребителя электрической энергии.

Механическая работа, совершаемая при движении проводника, должна затрачиваться на преодоление электромагнитной тормозной силы $F_т = BIl$, действующей в магнитном поле на проводник с то-

кем и направленной противоположно движущей механической силе I (рис. 3-17, *а* и *б*). В соответствии с правилом Ленца направление индуктированного тока (э. д. с.) в движущемся проводнике будет всегда таково, что обусловленная этим током электромагнитная (тормозная) сила $F_т$ будет направлена против механической силы, движущей проводник.

В рассматриваемой задаче направление э. д. с. индукции может быть определено по мнемоническому *правилу ладони правой руки*.

По закону сохранения энергии вся механическая энергия, подводимая извне, если пренебречь потерями на трение, преобразуется в электромагнитную энергию генератора. Следовательно, должен иметь место баланс мощностей

$$P_{мех} = P_{элм} \text{ или } Fv = EI.$$

Заменяя $F = -F_т = -BIl$ (знак минус с учетом противоположных направлений сил F и $F_т$), получаем $-BIlv = EI$, откуда $E = -Blv$ или по абсолютному значению $E = Blv$*.

По второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи (рис. 3-17, *а* и *б*) имеем:

$$E = Ir_0 + Ir \text{ или } E = Ir_0 + U.$$

Умножая обе части уравнения на ток I, получаем уравнение баланса мощностей

$$EI = I^2r_0 + UI \text{ или } P_{элм} = P_0 + P.$$

Подставляя в выведенные уравнения числовые данные, получаем: э. д. с. индукции в проводе $E = Blv = 1 \cdot 2 \cdot 10 = 20$ В. Ток в цепи $I = \dfrac{E}{r_0 + r} = \dfrac{20}{0{,}5 + 4{,}5} = 4$ А. Электромагнитная тормозная сила

$$F_т = BIl = 1 \cdot 4 \cdot 2 = 8 \text{ Н}.$$

При постоянной скорости движения движущая сила должна быть равна тормозной, следовательно, $F = 8$ Н.

Полная электромагнитная мощность генератора

$$P_{элм} = EI = 20 \cdot 4 = 80 \text{ Вт}.$$

Мощность электроприемника

$$P = I^2r = 16 \cdot 4{,}5 = 72 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь внутри источника

$$P_0 = I^2r_0 = 16 \cdot 0{,}5 = 8 \text{ Вт}.$$

Механическая мощность $P_{мех}$ равна электромагнитной $P_{элм}$: $P_{мех} = Fv = 8 \cdot 10 = 80$ Вт.

Напряжение на выводах генератора

$$U = E - Ir_0 = 20 - 4 \cdot 0{,}5 = 18 \text{ В}.$$

Ток генератора, определяемый из уравнения $I = \dfrac{E}{r_0 + r}$, является электрической нагрузкой генератора. С увеличением тока, и следо-

---

* В общем случае $E = Blv \sin \alpha$, где α — угол между направлениями векторов магнитной индукции $\bar{B}$ и скорости $\bar{v}$. В рассматриваемом примере $\alpha = 90°$, $\sin 90° = 1$ и $E = Blv$.

вательно, и электрической энергии, отдаваемой генератором во внешнюю цепь, увеличивается тормозная электромагнитная сила, для преодоления которой необходимо увеличить движущую механическую силу первичного двигателя, а следовательно, и его мощность. Это положение вытекает и из закона сохранения энергии.

Из курса физики известно, что наведение в проводниках э. д. с. индукции наблюдается не только при механическом относительном движении проводника и магнитного поля, но и при изменении во времени магнитного потока, сцепленного с контуром проводника. (Для катушки потокосцепление $\Psi = \Phi w$.) В случае равномерного нарастания или убывания магнитного потокосцепления э. д. с. выражается уравнением

$$E = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} \text{ или } E = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \text{ В.}$$

В случае неравномерного изменения потокосцепления контура мгновенное значение э. д. с. выражается дифференциальным уравнением

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \text{ или } e = -w\frac{d\Phi}{dt}.$$

Если изменение магнитного потока, сцепленного с катушкой, вызвано изменением в ней тока (например, в момент замыкания или размыкания цепи), то наводимая в катушке э. д. с. *самоиндукции* может быть определена по уравнению

$$e_L = -L\frac{di}{dt},$$

где L — индуктивность катушки, представляющая собой отношение потокосцепления ее к току, т. е.

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

Если два контура (например, две катушки) взаимно расположены так, что создаваемый током одного из них магнитный поток сцеплен с другим контуром, то при изменении тока в первом контуре вследствие изменения потокосцепления во втором контуре будет наведена э. д. с. *взаимной индукции*, мгновенное значение которой определяется по уравнению $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$, где w_2 — число витков второго контура, а $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока.

Заметим, что явление взаимной индукции имеет место в трансформаторах.

При наведении э. д. с. в результате изменения магнитного потокосцепления направление ее всегда оказывается таким, при котором создаваемый ею ток стремится противодействовать этому изменению.

Для определения направления э. д. с. можно пользоваться следующим правилом: если смотреть на электрический контур по направлению магнитного поля, пронизывающего его, то в случае увеличения магнитного потока индуктированная в контуре э. д. с. будет направлена против движения часовой стрелки, а при уменьшении магнитного потока — по направлению движения часовой стрелки. Это правило согласуется также с правилом Ленца.

3-16*. По проводу длиной $l=0{,}2$ м, находящемуся в равномерном магнитном поле с индукцией $B=1$ Т и расположенному в плоскости, перпендикулярной направлению поля, проходит ток от источника питания с неизменным напряжением $U=4$ В. Под действием электромагнитной силы провод будет перемещаться по направляющим, как показано на рис. 3-18. (Устройство представляет собой простейший электродвигатель.) Линии магнитного поля показаны на рис. 3-18 точками и направлены из-за плоскости чертежа к наблюдателю. Сопротивление активного провода (внутреннее сопротивление двигателя) $r_0=0{,}4$ Ом.

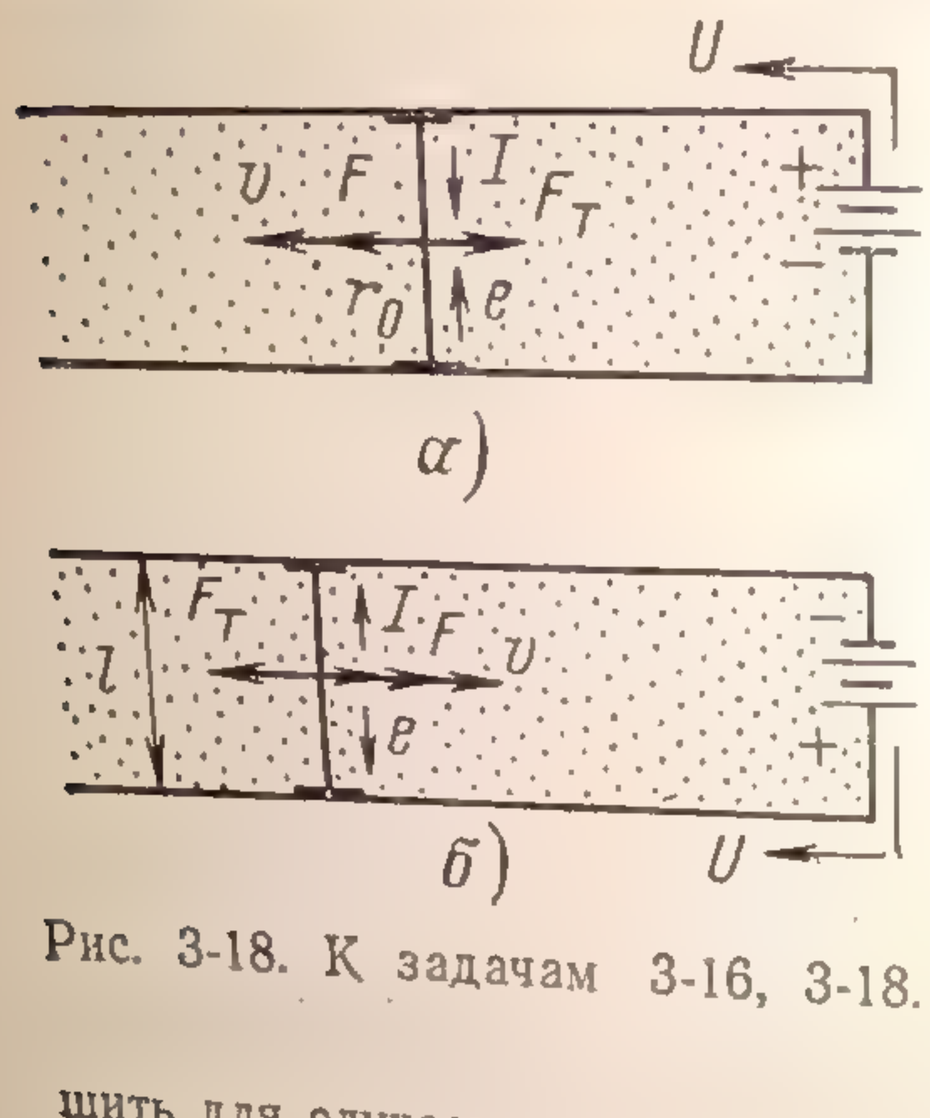


Рис. 3-18. К задачам 3-16, 3-18.

Пренебрегая сопротивлением направляющих, определить ток в момент включения, когда активный провод еще неподвижен (пусковой ток), движущую силу в начальный момент пуска $F_{пуск}$, движущую силу F и ток двигателя при постоянной установившейся скорости и составить уравнение баланса мощностей. Задачу решить для случаев, когда тормозная сила $F_т$ (механическая нагрузка двигателя) равна: а) 1,0 Н, б) 1,2 Н, в) 4 Н.

Анализ и решение

Направление электромагнитной силы, под действием которой происходит движение провода, определяется по правилу левой руки и показано на схеме рис. 3-18. При движении провода в нем индуктируется э. д. с. E, направление которой, определяемое по правилу правой руки, оказывается противоположным току (противо-э. д. с.).

По второму закону Кирхгофа для данной цепи имеем:

$$U-E=Ir_0.$$

Отсюда следует:

$$I=\frac{U-E}{r_0}. \qquad (1)$$

В момент начала пуска, когда скорость движения еще равна нулю и противо-э. д. с. $E=0$, ток в проводе

$$I_{пуск}=\frac{U}{r_0}=\frac{4}{0{,}4}=10\text{ А}.$$

Электромагнитная движущая сила при пуске

$$F_{пуск}=BI_{пуск}l=1\cdot10\cdot0{,}2=2\text{ Н}.$$

Тормозная сила $F_т$ для двигателя, приложенная извне, это та полезная механическая нагрузка, на преодоление которой двигатель совершает механическую работу.

Условием пуска двигателя в ход должно быть $F_т<F_{пуск}$.

Если условие пуска соблюдено, активный провод начнет двигаться с ускорением. При этом вследствие появления противо-э. д. с. ток согласно уравнению (1) будет уменьшаться. Уменьшение тока вызовет уменьшение электромагнитной силы ($F=BIl$) и дальнейшее приращение скорости. При $F=F_т$ ток и скорость двигателя достигнут установившихся значений.

Для случая «а» $F_т=1$ Н меньше $F_{пуск}=2$ Н, значит, условие пуска соблюдено и проводник будет двигаться с ускорением до тех пор, пока $F=F_т=1$ Н. Тогда скорость достигнет установившегося значения и ток двигателя определится из выражения $F=BIl$:

$$I=\frac{F}{Bl}=\frac{1}{1\cdot 0{,}2}=5\text{ А}.$$

Из уравнения второго закона Кирхгофа определим теперь противо-э. д. с. двигателя

$$E_{пр}=U-Ir_0=4-5\cdot 0{,}4=2\text{ В}.$$

Установившаяся скорость двигателя

$$v=\frac{E}{Bl}=\frac{2}{1\cdot 0{,}2}=10\text{ м/с}.$$

Умножив обе части уравнения Кирхгофа на ток I, получим уравнение баланса мощностей:

$$UI=EI+I^2r_0 \text{ или } P_{подвод}=P_{мех}+P_0.$$

Подводимая мощность

$$P_{подвод}=UI=4\cdot 5=20\text{ Вт}.$$

Механическая мощность двигателя

$$P_{мех}=EI=2\cdot 5=10\text{ Вт}.$$

Механическую мощность можно получить также из уравнения

$$P_{мех}=Fv=1\cdot 10=10\text{ Вт}.$$

Мощность потерь внутри двигателя

$$P_0=I^2r_0=25\cdot 0{,}4=10\text{ Вт}.$$

Проделав аналогичные расчеты при других нагрузках, в частности при нагрузке для случая «б» $F_т=1{,}2$ Н, можно легко убедиться в том, что с увеличением механической нагрузки ($F_т$) во столько же раз увеличится ток двигателя.

Нагрузка для случая «в» $F_т=4$ Н превышает движущую силу при пуске 2 Н. Поэтому условие пуска здесь не соблюдено ($F_т>F$), и активный провод не сможет тронуться с места, т. е. окажется полностью заторможенным. Если же эта нагрузка в 4 Н будет приложена в процессе работы двигателя, то произойдет снижение скорости его, пока он совсем не остановится. При этом в цепи питания двигателя будет самый большой ток, равный пусковому току 10 А. Вся мощность, подводимая к двигателю, преобразуется в теплоту, которая выделится в сопротивлении r_0.

Для этого случая скорость $v=0$, противо-э. д. с. $E=Blv=0$. Подводимая мощность $P_{подвод}=UI=4\cdot 10=40$ Вт.

Механическая мощность $P_{мех}=Fv=EI=0$ и мощность потерь внутри двигателя $P_0=I^2r_0=10^2\cdot0{,}4=40$ Вт.

Вопросы и упражнения к задачам 3-15, 3-16

1. Активный провод длиной 1 м, перемещающийся в равномерном магнитном поле с индукцией 1,5 Т перпендикулярно линиям магнитного поля со скоростью 4 м/с, может быть в режимах: а) генератора, б) двигателя, в) холостого хода, г) короткого замыка-

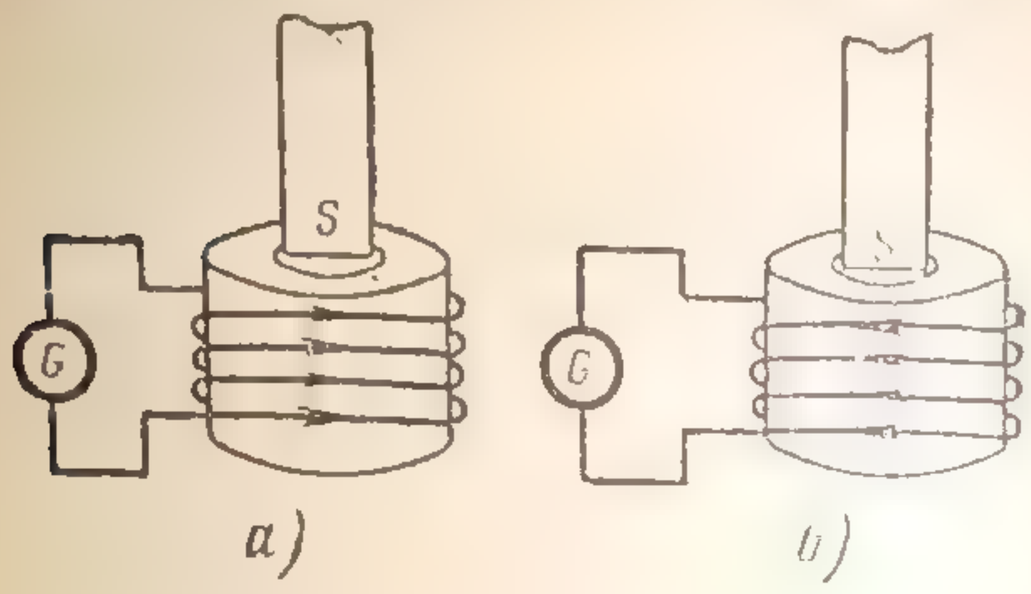


Рис. 3-19. К задачам 3-15, 3-16.

Рис. 3-20. К задачам 3-15, 3-16

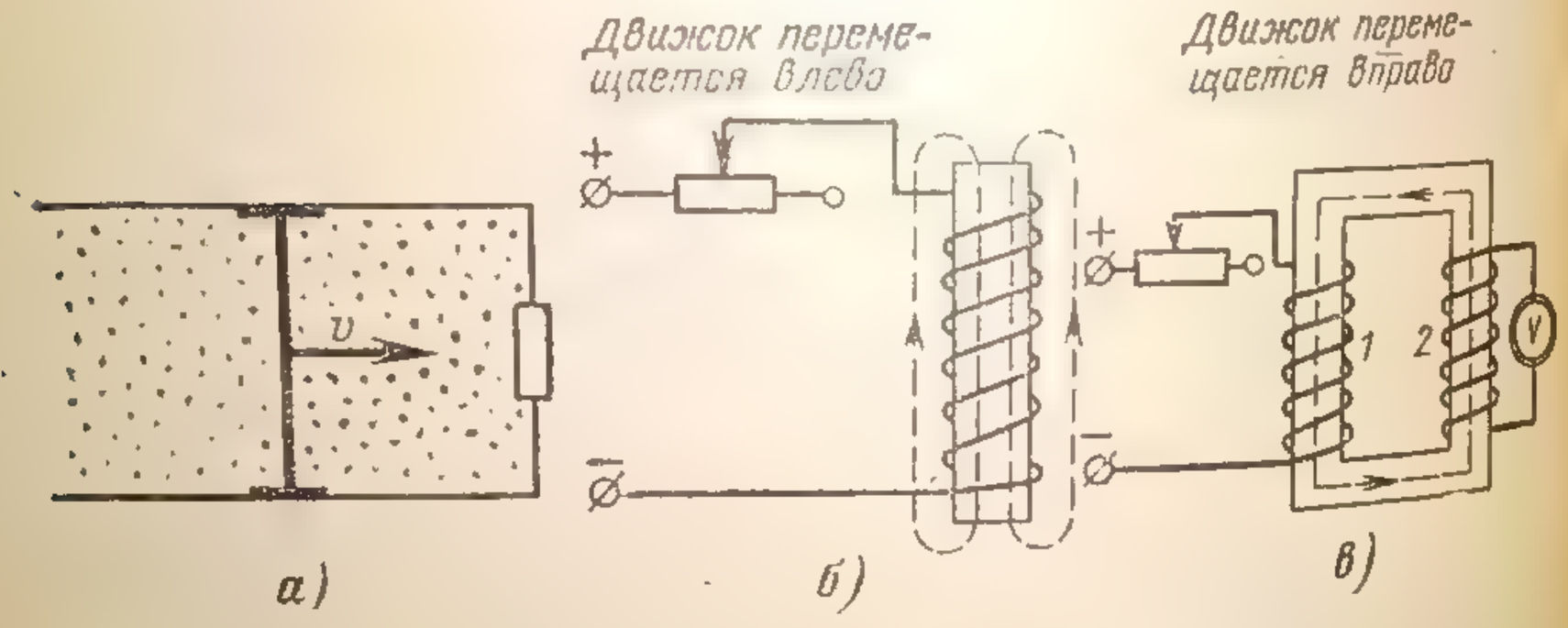


Рис. 3-21. К задачам 3-15, 3-16.

ния. Определить, в каком режиме работает провод, если напряжение на его концах равно 0; 4; 6; 8 В?

2. Решить предыдущий пример, если направление движения провода образует с направлением линий магнитного поля угол 60°.

3. При каком условии в контуре проводника индуктируется э. д. с.?

4. При вдвигании или выдвигании постоянного магнита в катушке индуктируется э. д. с. Указать направление движения магнита (вверх, вниз) при заданном направлении э. д. с. индукции в витках катушки (рис. 3-19, *а* и *б*). Определить также направление э. д. с. в обоих случаях.

5. Указать направление э. д. с. в катушке и определить ее знак при вдвигании магнита в катушку (рис. 3-20).

6. На схемах, приведенных на рис. 3-21, *а—в*, показаны случаи индуктирования э. д. с. а) электромагнитной индукции при движении провода в магнитном поле со скоростью v; б) самоин-

дукции в катушке при изменении тока в этой катушке и связанного с ним магнитного потока; в) взаимной индукции во второй катушке при изменении тока и связанного с ним магнитного потока первой катушки, пронизывающего также витки второй катушки. Точками и штриховыми линиями показаны линии магнитного поля. Определить направления э. д. с. для всех случаев.

3-17. Провод длиной $l=2$ м скользит по направляющим в равномерном магнитном поле с индукцией $B=1$ Т под действием посторонней силы F со скоростью $v=10$ м/с (рис. 3-17, *в*). Внутреннее сопротивление генератора (сопротивление активного провода) $r_0=0{,}5$ Ом. Сопротивлением направляющих пренебречь. Сопротивление r внешней цепи изменяется от ∞ до нуля. Определить э. д. с. индукции E, напряжение на выводах внешней цепи U, электромагнитную силу (тормозную) $F_т$, движущую силу F, механическую мощность $P_{мех}=Fv$, электрическую мощность $P_{эл}=EI$, мощность потребителя $P=U$, мощность потерь внутри генератора (активного провода) $P=I^2r_0$, электрический к. п. д. генератора $\eta_э=\dfrac{P}{P_{мех}}100$ и внешнее сопротивление r для значений тока, указанных в таблице. В эту же таблицу записать данные расчета и произвести по ним проверку баланса мощностей. Данные при нагрузке $I=4$ А взяты из решения задачи 3-15.

I, А	E, В	U, В	$F_т$, Н	F, Н	$P_{мех}$, Вт	$P_{эл}$, Вт	P, Вт	P_0, Вт	$\eta_э$, %	r, Ом
4	20	18	8	8	80	80	72	8	90	4,5
0										
16										
32										
40										

3-18. На рис. 3-18 дана упрощенная модель работы двигателя. Здесь вместо потребителя электрической энергии с сопротивлением r, как это имело место при генераторном режиме, включен источник питания с постоянным напряжением U.

Принимая $U=20$ В, $B=1$ Т, $r_0=0{,}5$ Ом (сопротивление активного проводника), $l=2$ м и пренебрегая сопротивлением направляющих, определить пусковой ток в момент включения $I_{пуск}$, электромагнитную силу в начальный момент пуска $F_{пуск}$.

Тормозная сила $F_т$ (механическая нагрузка) двигателя изменяется от 0 до 80 Н. Для разных значений тормозной силы определить движущую силу F, ток двигателя I, противо-э. д. с. E, установившуюся скорость v, электрическую мощность $P_{эл}=UI$, механическую мощность $P_{мех}=EI=Fv$, мощность потерь внутри двигателя $P_0=I^2r_0$ и электрический к. п. д. двигателя $\eta_э=\dfrac{P_{мех}}{P_{эл}}100$.

Значения тормозной силы $F_т$ указаны в таблице. В эту же таблицу записать данные расчета и произвести по ним проверку баланса мощностей.

$F_т$, Н	F, Н	I, А	E, В	v, м/с	$P_{эл}$, Вт	$P_{мех}$, Вт	P_0, Вт	$\eta_э$, %
0								
20								
40								
60								
80								

3-19. Между полюсами N и S постоянного магнита помещен стальной цилиндр диаметром $D=100$ мм и длиной $l=150$ мм. Прямоугольная катушка, охватывающая цилиндр, может вращаться в магнитном поле полюсов (рис. 3-22). При любом положении катушки направление вектора линейной скорости перпендикулярно линиям магнитного поля. Число витков катушки $w=100$, концы ее присоединены к двум половинкам разрезанного медного кольца (коллектора), вращающегося вместе с катушкой. Сопротивление катушки $r_0=0{,}5$ Ом и средняя магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{ср}=0{,}53$ Т. Устройство может работать и как генератор и как двигатель.

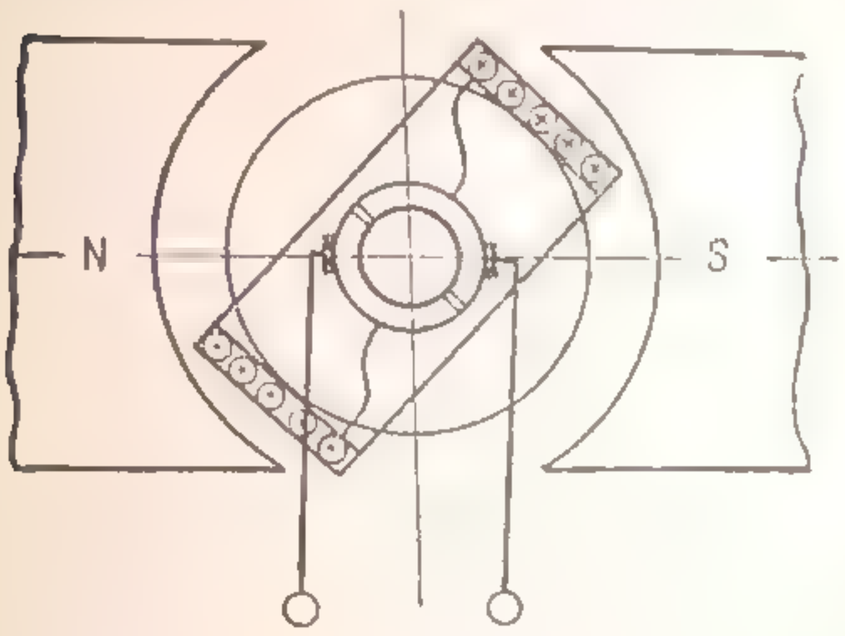


Рис. 3-22. К задаче 3-19.

Условие 1. Устройство работает как генератор. Катушка с коллектором приведена во вращение с частотой $n=300$ об/мин. Через щетки, наложенные на коллектор, присоединено внешнее сопротивление r, Ом. Определить э. д. с. E, наводимую в катушке, сопротивление внешней цепи r, напряжение на щетках U, тормозной момент $M_т$, вращающий момент $M_{вр}$, к. п. д. $\eta_э$ и произвести проверку баланса мощностей. Задачу решить для значений тока: 0; 5; 10; 20; 50 А. Для сравнения данные расчетов записать в таблицу, аналогичную приведенной в условии задачи 3-17.

Указание. Данная задача повторяет по существу условия задач 3-15 и 3-17 с той лишь разницей, что здесь поступательное движение заменено вращательным и соответственно линейная скорость v заменена угловой скоростью ω (частотой вращения n, об/мин), тормозная сила $F_т$ — тормозным моментом $M_т$ и движущая сила F — вращающим моментом $M_{вр}$. Поэтому ход решения задачи по данному условию будет таким же, как для задачи 3-17.

Электродвижущая сила, индуктированная в катушке, определяется по формуле $E=2wBlv$ (умножается на $2w$, так как э. д. с. индуктируется в двух активных проводниках каждого витка обмотки).

Для определения э. д. с. нужно предварительно выразить угловую скорость ω и затем линейную скорость v:

$$\omega=\frac{2\pi n}{60},\ \text{рад/с};\quad v=\frac{2\pi\frac{D}{2}n}{60}=\omega\frac{D}{2},\ \text{м/с}.$$

Теперь э. д. с $\dot{E} = 2\omega Bl\omega \frac{D}{2}$.

Ток в цепи $I = \frac{E}{r + r_0}$. Электромагнитный тормозной момент выразится:

$$M_т = F_т \frac{D}{2} = 2\omega I l \dot{B}_{ср} \frac{D}{2}.$$

Здесь $F_т$ — полная тормозная сила, действующая на обе активные стороны катушки.

При постоянной скорости движения вращающий момент должен быть равен тормозному. Следовательно, $M_{вр} = M_т$.

Электромагнитная мощность генератора должна быть равна механической мощности первичного двигателя, приводящего во вращение катушку:

$$P_{элм} = EI \text{ или } P_{элм} = F_т v = F_т \omega \frac{D}{2} = M_т \omega.$$

Мощность, переданная во внешнюю цепь, $P = UI_2 = I^2 r$.
Мощность потерь внутри источника $P_0 = I^2 r_0$.
Баланс мощностей $P_{элм} = P + P_0$.
Напряжение между щетками $U = Ir$. Электрический к. п. д.

$$\eta_э = \frac{P}{P_{элм}} 100 = \frac{UI}{EI} 100.$$

Условие 2. Устройство работает как двигатель. К щеткам, наложенным на коллектор, подведено напряжение $U = 23$ В. Определить вращающий момент и ток в начальный момент пуска и при установившейся скорости, противо-э. д. с. E, частоту вращения рамки, к. п. д. и произвести проверку баланса мощностей. Задачу решить для случаев, когда тормозной момент (механическая нагрузка двигателя), приложенный извне, равен 0; 5; 10; 20; 30; 36,5 Н·м.

Для сравнения данные расчетов записать в таблицу, аналогичную приведенной в условии задачи 3-18.

Указание. Данная задача аналогична задачам 3-16 и 3-18. Здесь поступательное движение провода заменено вращательным движением катушки. Соответственно движущая сила F заменена вращающим моментом $M_{вр}$, тормозная сила $F_т$ — тормозным моментом $M_т$ и линейная скорость v — угловой скоростью ω (или частотой вращения n). Поэтому ход решения данной задачи будет таким же, как задачи 3-18.

Пусковой ток

$$I_{пуск} = U/r_0.$$

Момент при пуске

$$M_{пуск} = F_{пуск} \frac{D}{2} = B_{ср} I_{пуск} l \cdot 2w \frac{D}{2}.$$

Здесь $F_{пуск}$ — полная электромагнитная сила, действующая на обе активные стороны катушки.

Условие пуска $M_т < M_{вр.пуск}$. При установившейся скорости $M_{вр} = M_т$.

$$M_{вр} = F\frac{D}{2} = B_{ср}\,Il \cdot 2\omega\frac{D}{2},$$

откуда ток

$$I = \frac{M_{вр}}{B_{ср}\,l\omega D}.$$

Противо-э. д. с. двигателя выразится

$$E = U - Ir_0 = 2\omega B_{ср}\,lv,$$

откуда линейная скорость двигателя

$$v = \frac{E}{2\omega B_{ср}\,l}.$$

Теперь из выражения для скорости $v = \pi Dn/60$ можно определить частоту вращения n.

Подводимая мощность $P_{подв} = UI$.

Механическая мощность двигателя $P_{мех} = EI$.

Механическую мощность можно также получить другим путем:

$$P_{мех} = Fv = F\omega\frac{D}{2} = M_{вр}\,\omega = M_{вр}\frac{2\pi n}{60} = 0{,}105 M_{вр}\,n.$$

Мощность потерь на нагрев обмотки $P_0 = I^2 r_0$ и баланс мощностей $P_{подв} = P_{мех} + P_0$.

Коэффициент полезного действия $\eta_э = \dfrac{P_{мех}}{P_{подв}}\,100 = \dfrac{EI}{UI}\,100$.

3-20*. Катушка с индуктивностью $L = 8$ Г и сопротивлением $r_к = 4$ Ом и параллельно присоединенная к ней лампа накаливания мощностью 1000 Вт с ничтожной индуктивностью (рис. 3-23) включаются в сеть постоянного тока с напряжением $U = 110$ В, равным номинальному напряжению лампы.

Условие 1. Определить для лампы и катушки установившийся ток, время нарастания тока, э. д. с. самоиндукции в момент включения цепи.

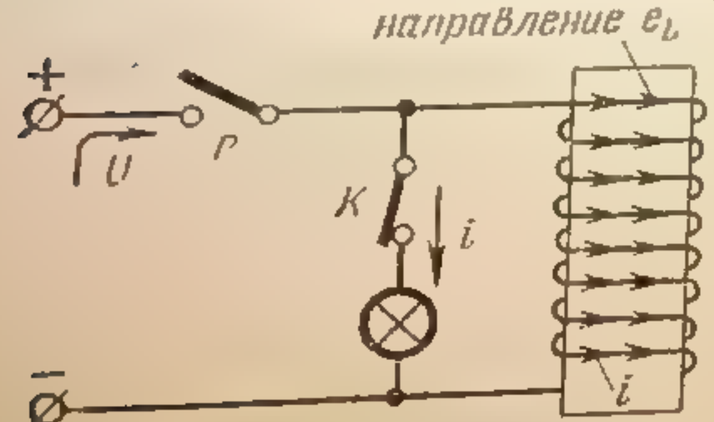


Рис. 3-23. К задаче 3-20.

Анализ и решение

При включении цепи ток в катушке $i_к$ и связанный с ним магнитный поток Ф увеличиваются и вследствие этого в катушке индуктируется э. д. с. самоиндукции.

При возрастании тока в катушке $di_к/dt > 0$ и э. д. с. самоиндукции отрицательна, т. е. направлена против тока.

При уменьшении тока $di_к/dt < 0$ и э. д. с. самоиндукции положительна, т. е. совпадает с током по направлению.

При включении цепи по второму закону Кирхгофа имеем:

$$U + e_L = i_к r_к \text{ или } U - L\frac{di_к}{dt} = i_к r_к.$$

Отсюда

$$\frac{di_к}{dt} = \frac{U - i_к r_к}{L}.$$

Разделив числитель и знаменатель правой части на $r_к$, получим:

$$\frac{di_к}{dt} = \frac{\frac{U}{r_к} - i_к}{L/r_к}.$$ Установившийся ток в катушке

$$I_к = \frac{U}{r_к} = \frac{110}{4} = 27{,}5 \text{ А}.$$

Отношение $L/r_к = \tau$ называется *постоянной времени* $[\tau] = [L/r] = \text{Ом}\cdot\text{с}/\text{Ом} = \text{с}$. В нашем случае $\tau = 8/4 = 2$ с.

Скорость нарастания тока теперь выразится:

$$\frac{di_к}{dt} = \frac{I_к - i_к}{\tau}, \qquad (1)$$

т. е. зависит от постоянной времени τ, а э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L\frac{di_к}{dt} = -L\frac{I_к - i_к}{L/r_к} = -(I_к r_к - i_к r_к) = -(U - i_к r_к). \qquad (2)$$

В начальный момент времени $i_к = 0$ и скорость нарастания тока $\left(\frac{di_к}{dt}\right)_{t=0} = \frac{I_к}{\tau}$, э. д. с. самоиндукции $(e_L)_{t=0} = -U = -110$ В. При установившемся токе ($i_к = I_к$) скорость нарастания тока и э. д. с. самоиндукции равны нулю [1].

Вид кривых тока $i_к$ и э. д. с. самоиндукции e_L в функции времени в переходном процессе показан на рис. 3-24.

Практически время переходного процесса в катушке $T_к = 5\tau$. Следовательно, для данной задачи $T_к = 5 \cdot 2 = 10$ с.

Для лампы накаливания индуктивность ничтожно мала, поэтому τ близко к нулю и можно считать, что ток лампы достигает установившегося значения почти мгновенно: $I = \frac{U}{r} = \frac{110}{12} = 9{,}2$ А,

где r — сопротивление лампы, $r = \frac{U^2}{P} = \frac{110^2}{1100} \approx 12$ Ом.

Условие 2. После достижения установившегося тока цепь рис. 3-23 отключается от сети. Определить время убывания тока, э. д. с. самоиндукции в катушке и напряжение на выводах лампы в момент выключения в цепи.

---

[1] Путем интегрирования дифференциального уравнения (1) и подстановки в уравнение (2) для мгновенных значений тока и э. д. с. самоиндукции получим выражения $i_к = I_к(1 - e^{-t/\tau})$ и $e_L = -Ue^{-t/\tau}$, где e — основание натуральных логарифмов, t — время, с. При $t = 5\tau$ имеем $i_к = 0{,}9933 I_к$, т. е. $i_к$ отличается от установившегося значения меньше чем на 1%.

Анализ и решение

При размыкании рубильника ток в цепи катушка — лампа, поддерживаемый э. д. с. самоиндукции, будет постепенно уменьшаться. В этом случае $e_L = i_к(r_к + r)$ или $-L\frac{di_к}{dt} = i_к(r_к + r)$ и скорость изменения тока

$$\frac{di_к}{dt} = -\frac{i_к}{\frac{L}{r_к + r}} = -\frac{i_к}{\tau}.$$

В момент выключения цепи $(i_к)_{t=0} = \frac{U}{r_к} = \frac{110}{4} = 27{,}5$ А. Такой же ток будет протекать теперь через лампу, которая присоединена к выводам катушки и имеет сопротивление $r = 12$ Ом (решение задачи по условию 1).

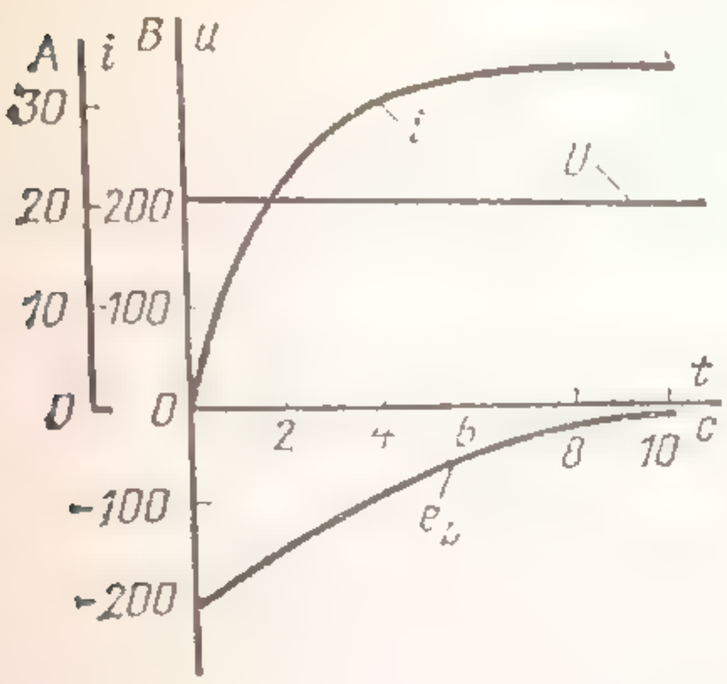


Рис. 3-24. К задаче 3-20.

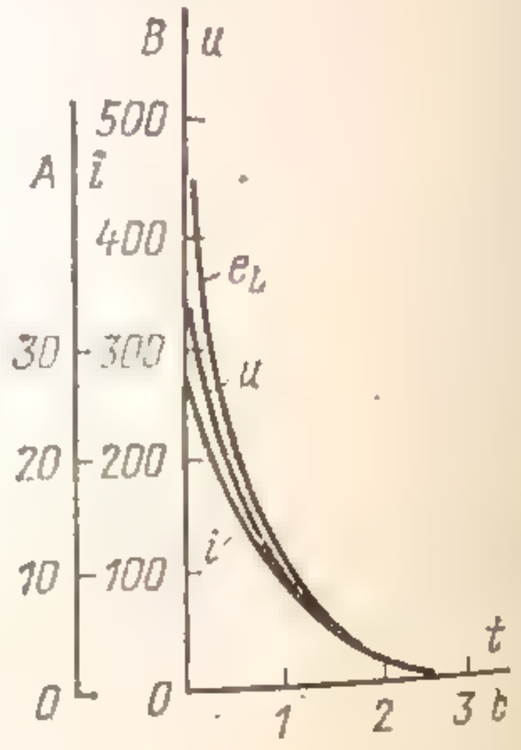


Рис. 3-25. К задаче 3-20.

Электродвижущая сила $e_L = -L\frac{di_к}{dt} = \frac{L}{\tau} i_к = (r_к + r) i_к$ и напряжение на выводах лампы (катушки)

$$U = i_к r. \qquad (4)$$

В момент выключения цепи

$$e_{L(t=0)} = \frac{U}{r_к}(r_к + r) = 27{,}5 \cdot (4 + 12) = 440 \text{ В},$$

Напряжение на выводах лампы $U_{t=0} = 27{,}5 \cdot 12 = 330$ В. Таким образом, в начальный момент времени на выводах лампы и катушки получается напряжение, значительно превышающее номинальное (перенапряжение). Поэтому лампа сначала ярко загорится, а затем будет постепенно погасать. Но время T переходного процесса теперь будет значительно меньше, так как

$$\tau = \frac{L}{r_к + r} = \frac{8}{4 + 12} = 0{,}5 \text{ с} \quad \text{и} \quad T = 5\tau = 2{,}5 \text{ с}.$$

Вид кривых тока $i_к$ и напряжения на выводах лампы u в функции времени показан на рис. 3-25 [1].

*Вопросы и упражнения к задаче 3-20**

1. Определить установившийся ток, э. д. с. самоиндукции в начальный момент времени и длительность процесса нарастания тока при включении катушки с индуктивностью 8 Г и сопротивлением 40 Ом в сеть постоянного тока с напряжением 280 В.

2. Для катушки предыдущей задачи определить э. д. с. самоиндукции в момент увеличения тока до 3 и 6 А.

3. Катушка с параллельно присоединенной к ней лампой накаливания питается от сети постоянного тока с напряжением 200 В. Индуктивность катушки 8 Г, сопротивление ее 10 Ом, сопротивление лампы в накаленном состоянии 140 Ом (рис. 3-23). Определить ток, э. д. с. самоиндукции, напряжение на выводах лампы в начальный момент времени и длительность процесса уменьшения указанных величин при выключении рубильника P.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4-1. ПОНЯТИЕ ОБ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ. ПОНЯТИЕ О КОММУТАЦИИ. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВРАЩАЮЩИЙ И ТОРМОЗНОЙ МОМЕНТЫ

4-1*. На рис. 4-1, *а* и 4-2, *а* изображены в разрезе параллельная и последовательная обмотки якоря четырехполюсной машины постоянного тока.

Магнитный поток полюса машины $\Phi = 25 \cdot 10^{-3}$ Вб, число витков в секции обмотки $w = 3$, частота вращения якоря $n = 1500$ об/мин.

Условие 1. Произвести проверочный расчет данных обмоток и определить в обоих случаях э. д. с. обмотки якоря.

Анализ и решение

Обмотка якоря состоит из 9 секций (катушек) по три витка в каждой. Секции укладываются в пазах якоря в два слоя, что позволяет выполнить обмотку якоря по шаблону. Секции имеют активные стороны, в которых индуктируется э. д. с. Активные стороны лежат в пазах якоря (показаны на рис. 4-1, *а* и 4-2, *а* кружками). Секции имеют задние торцевые части, показанные на рисунках пунктиром, и лобовые части — сплошные изогнутые линии — при-

[1] Если проинтегрировать дифференциальное уравнение (3), то для мгновенного значения тока получим выражение $i_к = \frac{U}{r_к} e^{-t/\tau}$. Подставив полученное выражение в уравнение (4), получим выражение для мгновенного значения напряжения на выводах катушки $u = U \frac{r}{r_к} e^{-t/\tau}$, где e — основание натуральных логарифмов, t — время.

соединяемые к медным, изолированным одна от другой, пластинам коллектора, на которых происходит соединение секций между собой. Так как обмотка якоря двухслойная, число пазов z должно быть равно числу секций s и числу коллекторных пластин k. В данном случае $z=s=k=9$.

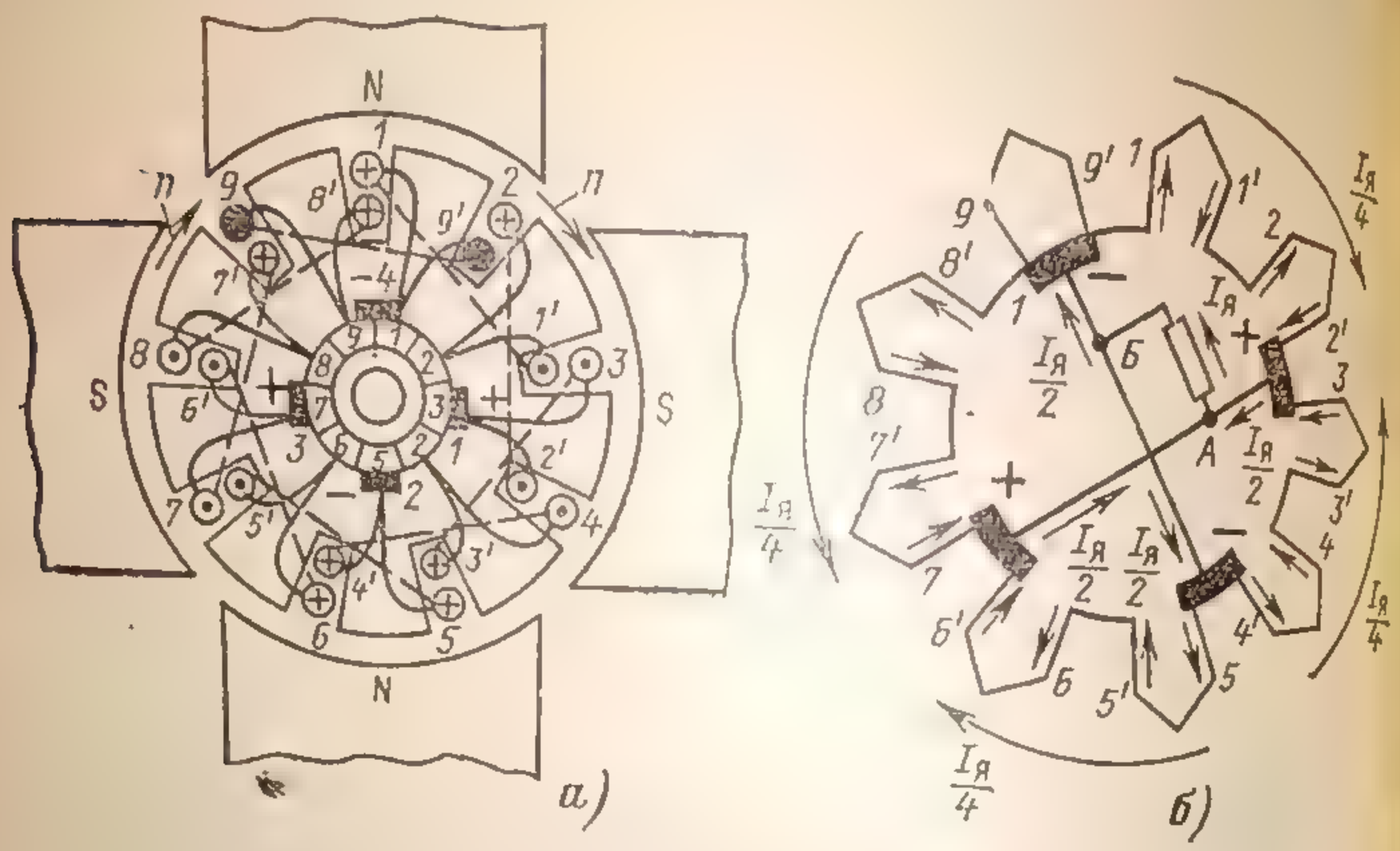


Рис. 4-1. К задаче 4-1.

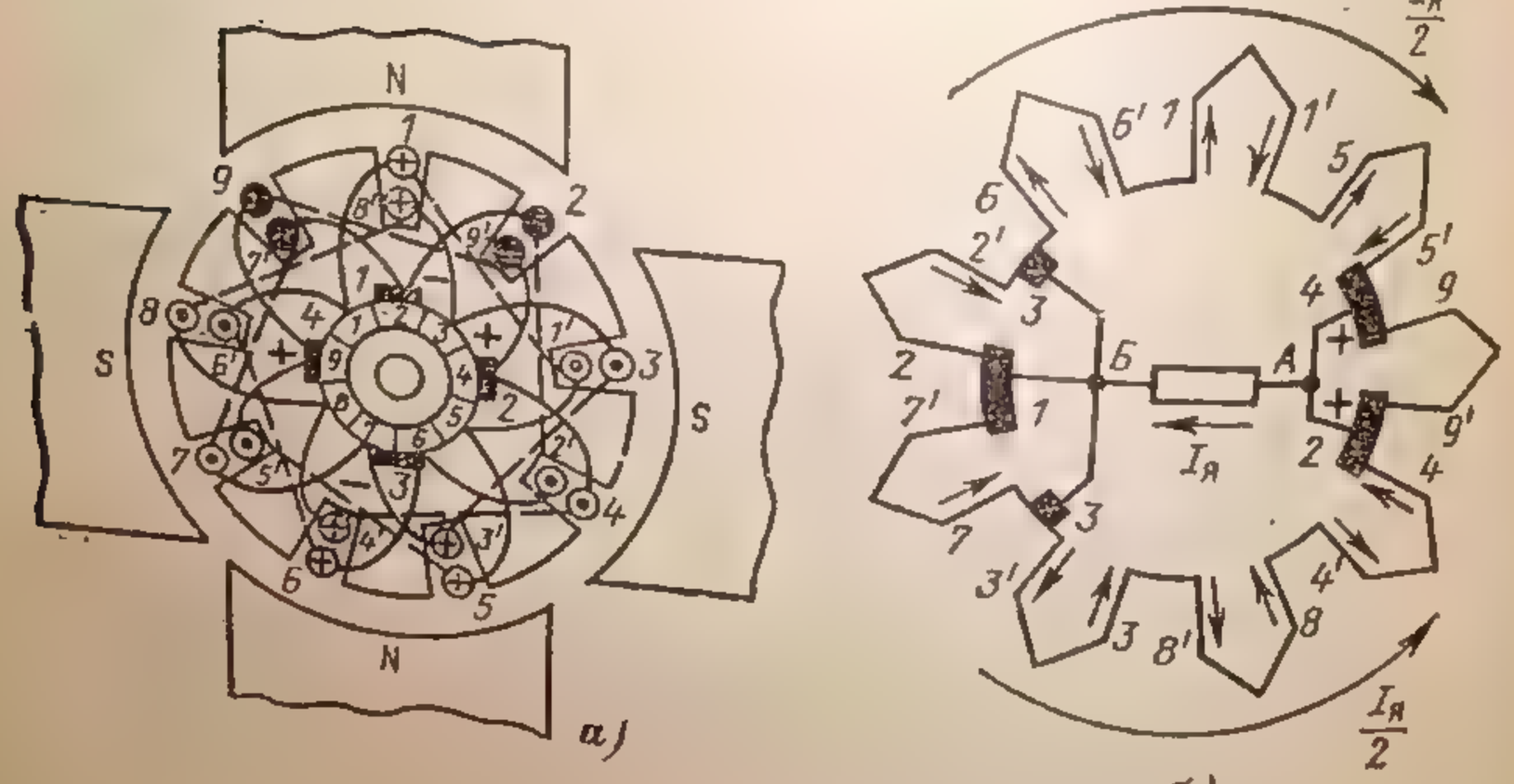
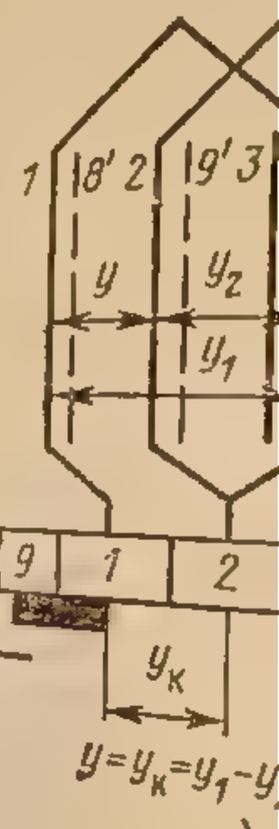


Рис. 4-2. К задаче 4-1.

Расстояние между активными сторонами каждой секции или первый частичный шаг y_1 должен быть примерно равен полюсному делению τ — расстоянию между центрами двух соседних полюсов по окружности якоря: $\tau=\pi D_я/2p$, где $D_я$ — диаметр якоря, $2p$ — число полюсов (всегда четное). При этом условии э. д. с., индуктированные в двух активных сторонах каждого витка секции, будут складываться (например, в активных сторонах секций $1-1'$,

$2-2'$; $3-3'$ и др.
шаг, измеренный
$y_1=\frac{z}{2p}-\varepsilon$, где
$\frac{z}{2p}$, чтобы y_1 выр
$2p$
В нашем случа
Второй частич
чалом следующей
у между началом
ходу обмотки, изм
от типа обмотки.



Для параллельн
рующий шаг, равный
С другой сторон
Для последователь
4-3, б). С другой сто
данной задачи $y=y$
изображенные на р
гам. Неподвижны
контакт коллекто
правления э. д. с
ляются по прави
Для опреде
ную схему обм
средственно п
жду собой по
Петлева
тырех пара
$2a=2p$.
7—79

2—2′, 3—3′ и др. на рис. 4-1, *а* и 4-2, *а*). Тогда первый частичный шаг, измеренный числом пропущенных зубцов по ходу обмотки, $y_1 = \frac{z}{2p} - \varepsilon$, где ε — наименьшее число, которое нужно вычесть из $\frac{z}{2p}$, чтобы y_1 выразился целым числом.

В нашем случае $y_1 = \frac{9}{4} - \frac{1}{4} = 2$.

Второй частичный шаг y_2 между концом одной секции и началом следующей секции по ходу обмотки и результирующий шаг y между началом одной секции и началом следующей секции по ходу обмотки, измеренные числом пропущенных зубцов, зависят от типа обмотки.

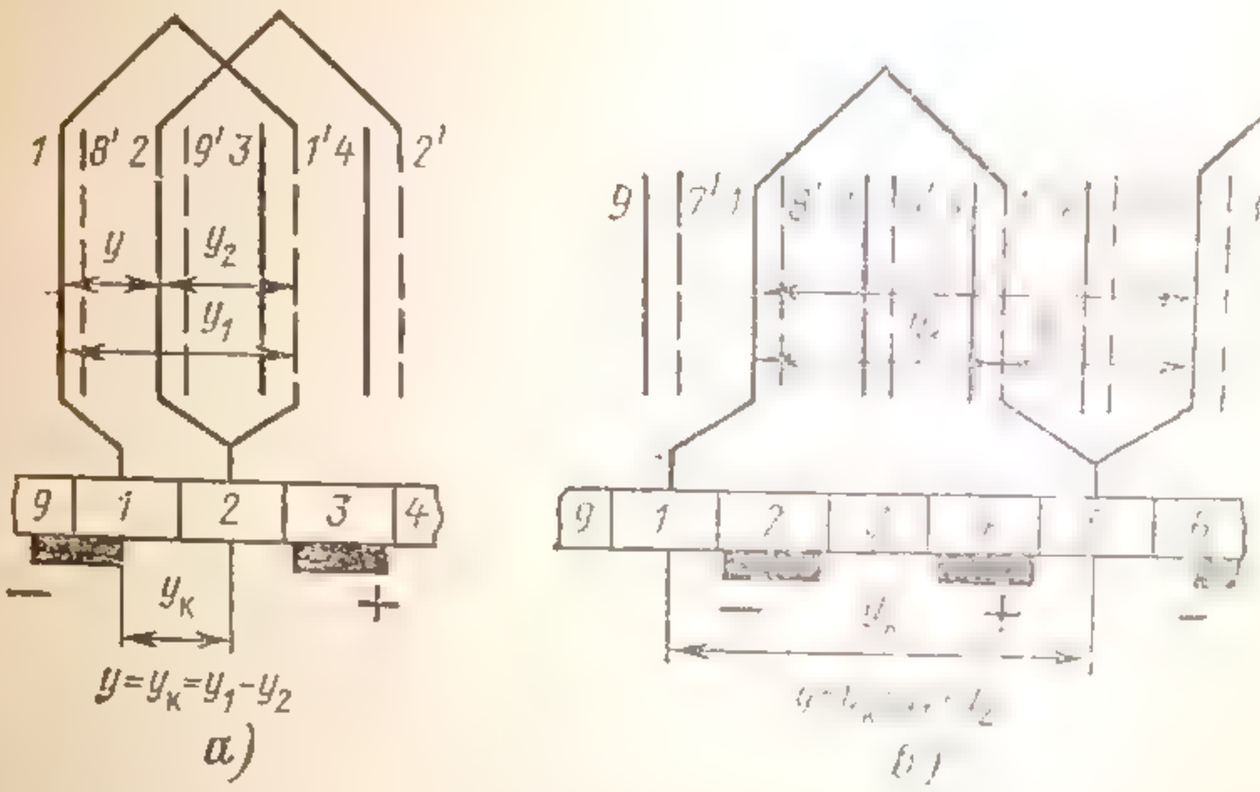


Рис. 4-3. К задаче 4-1.

Для параллельной (петлевой) обмотки (рис. 4-3, *а*) результирующий шаг, равный в данном случае шагу по коллектору, $y = y_к = 1$. С другой стороны, $y = y_1 - y_2$, откуда $y_2 = y_1 - y = 2 - 1 = 1$.

Для последовательной (волновой) обмотки $y = y_к = \frac{z-1}{p}$ (рис. 4-3, *б*). С другой стороны, $y = y_1 + y_2$, откуда $y_2 = y - y_1$. В условиях данной задачи $y = y_к = \frac{9-1}{2} = 4$ и $y_2 = 4 - 2 = 2$. Обмотки якоря, изображенные на рис. 4-1, *а* и 4-2, *а*, выполнены по рассчитанным шагам. Неподвижные угольно-графитные щетки, осуществляющие контакт коллектора с внешней цепью, наложены на коллектор. Направления э. д. с. в активных проводниках обмотки якоря определяются по правилу правой руки.

Для определения э. д. с. машины удобно рассмотреть упрощенную схему обмотки якоря без коллектора, на которой щетки непосредственно примыкают к секциям обмотки якоря, соединенным между собой по ходу обмотки (рис. 4-1, *б* и 4-2, *б*).

Петлевая (параллельная) обмотка (рис. 4-1, *б*) состоит из четырех параллельных ветвей, т. е. число их равно числу полюсов $2a = 2p$. В положении якоря с обмоткой, показанном на рис. 4-1, *а*

и *б*, в каждую параллельную ветвь входят по две секции, соединенные последовательно, в которых э. д. с. складываются. При вращении якоря в его обмотке индуктируется переменная по значению и направлению э. д. с. Изменение направления э. д. с. в секции на обратное происходит при переходе секций из одной параллельной ветви в другую. Процесс переключения секций называется коммутацией. В данном положении обмотки якоря (рис. 4-1, *а* и *б*) переключается секция *9—9'*, которая через коллекторные пластины *1* и *2* замкнута щеткой накоротко. По отношению к неподвижным щеткам направления э. д. с. в параллельных ветвях все время будут сохраняться неизменными и на щетках будет постоянная полярность [1]. Щетки одной полярности соединяются между собой на выводах *А* и *Б*, к которым присоединяется внешняя цепь генератора или питающая сеть (в случае двигателя).

Средняя э. д. с., индуктированная в одном активном проводе обмотки якоря,

$$E_{\text{пр}} = B_{\text{ср}}\, l v = B_{\text{ср}}\, l \omega \frac{D_{\text{я}}}{2} = B_{\text{ср}}\, l \frac{2\pi n}{60} \frac{D_{\text{я}}}{2},$$

где $B_{\text{ср}}$ — средняя магнитная индукция в воздушном зазоре вдоль полюсного деления; l — активная длина провода; ω — угловая скорость; $D_{\text{я}}$ — диаметр якоря; n — частота вращения, выраженная числом оборотов в минуту.

Электродвижущая сила машины E определится как сумма средних э. д. с., индуктированных в последовательно соединенных проводах одной параллельной ветви. Если общее число проводов обмотки N, то число проводов в одной параллельной ветви $N/2a$. Следовательно, э. д. с. машины

$$E = E_{\text{пр}} \frac{N}{2a} = B_{\text{ср}}\, l \frac{2\pi n}{60} \frac{D_{\text{я}}}{2} \frac{N}{2a}.$$

Так как $\pi D_{\text{я}}/2p = \tau$, то, заменяя $\pi D_{\text{я}} = 2p\tau$ и учитывая, что $l\tau = S$ (площадь полюса) и $B_{\text{ср}}S = \Phi$ (магнитный поток полюса), получим окончательно

$$E = \frac{p}{a} \frac{N}{60} n\Phi = k_e\, n\Phi,$$

где k_e — постоянная для данной машины, равная $\frac{p}{a}\frac{N}{60}$. Общее число активных проводов обмотки $N = 2Sw$. Подставляя числовые данные для параллельной обмотки, получаем $N = 2 \cdot 9 \cdot 3 = 54$:

$$E = \frac{2}{2} \cdot \frac{54}{60} 1500 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \approx 34\ \text{В}.$$

Упрощенная схема последовательной обмотки представлена на рис. 4-2, *б*. Расставив щетки так же, как и в предыдущем случае, легко видеть, что для данного положения обмотки якоря щетка *3*, перекрывая две коллекторные пластины, должна находиться между активными сторонами обмотки *2* и *7*, поэтому на схеме эта щетка

---

[1] Напряжение на щетках, будучи постоянным по направлению, изменяется по значению. Однако эти изменения (пульсации) при большом числе секций в каждой параллельной ветви будут весьма незначительны.

условно расщеплена на две щетки между сторонами *3′—7* и *2′—6*. Соединив между собой щетку *3* со щеткой *1* того же знака и щетки *4* и *2*, убеждаемся, что теперь обмотка якоря разделена на две параллельные ветви. Это положение является общим для волновой (последовательной) обмотки независимо от числа полюсов, т. е. $2a=2$.

Для данного положения обмотки в каждую параллельную ветвь входят по три секции, соединенные последовательно, а секции *7′—7*, *2—2′* и *9—9′*, замкнутые щетками накоротко, находятся в процессе коммутации.

Общая э. д. с. машины может быть определена по выведенной выше формуле, а именно:

$$E=\frac{p}{a}\frac{N}{60}n\Phi=\frac{2}{1}\cdot\frac{54}{60}1500\cdot25\cdot10^{-3}=68\text{ В}.$$

Следовательно, э. д. с. машины при последовательной обмотке получилась в 2 раза большей, чем при тех же условиях для параллельной обмотки.

Условие 2. Допустимый по условиям нагрева ток в проводах обмотки якоря $I_{доп}=5$ А, магнитный поток полюса $\Phi=25\cdot10^{-3}$ Вб. Определить номинальный ток якоря и момент якоря машины $M_я$ (тормозной для генератора и вращающий для двигателя) при номинальном токе и частоте вращения $n=1450$ об/мин.

Анализ и решение

Параллельная обмотка якоря имеет число параллельных ветвей, равное числу полюсов, $2a=2p$ (рис. 4-1, *а* и *б*). Последовательная обмотка независимо от числа полюсов имеет число параллельных ветвей $2a=2$ (решение задачи по условию 1). Следовательно, наибольший допустимый ток якоря для машины с параллельной обмоткой $I_{я.н1}=2a\cdot I_{доп}=4\cdot5=20$ А (рис. 4-1, *б*), для машины с последовательной обмоткой $I_{я.н2}=2a\cdot I_{доп}=2\cdot5=10$ А (рис. 4-2, *б*).

Механическая мощность, подводимая к якорю генератора или развиваемая якорем двигателя, выразится (задачи 3-15, 3-16, 3-19) $P_{мех}=EI_я=M_я\omega$. Заменяя угловую скорость $\omega=\frac{2\pi n}{60}$ и $E=\frac{p}{a}\frac{N}{60}n\Phi$ (решение задачи по условию 1), получаем:

$$\frac{p}{a}\frac{N}{60}n\Phi I_я=M_я\frac{2\pi n}{60}.$$

Отсюда

$$M_я=\frac{p}{a}\frac{N}{2\pi}\Phi I_я=k_м\Phi I_я,$$

где $k_м$ — постоянная для данной машины величина, равная $\frac{p}{a}\frac{N}{2\pi}$.

Если мощность выражена в ваттах, момент якоря будет выражаться в $[M_я]=\left[\frac{P_{мех}}{\omega}\right]=\text{Вт}\cdot\text{с}=\text{Дж}=\text{Н}\cdot\text{м}$. Учитывая, что $1\text{ Н}\cdot\text{м}=0{,}102$ кгс·м, можно момент якоря выразить в кгс·м.

В условиях данной задачи для машины с параллельной обмоткой

$$M_я = \frac{2}{2}\frac{54}{2\pi} 25 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 4{,}3 \text{ Н·м},$$

Для машины с последовательной обмоткой

$$M_я = \frac{2}{1}\frac{54}{2\pi} 25 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 4{,}3 \text{ Н·м}.$$

Вопросы и упражнения к задаче 4-1

1. Рассчитать шаги параллельной и последовательной обмоток якоря для двухполюсной машины постоянного тока, если $z=k=S=9$.

2. Решить предыдущую задачу для четырехполюсной машины, если $z=k=s=25$.

3. При частоте вращения якоря 1150 об/мин э. д. с. в обмотке якоря 120 В. Определить э. д. с. при частоте вращения 2850 об/мин и неизменном магнитном потоке.

4. Определить, как изменится электромагнитный момент якоря генератора, если при неизменных магнитном потоке и токе якоря частоту вращения увеличить в 1,5 раза.

4-2. Обмотка якоря четырехполюсной машины состоит из 47 одновитковых секций. Якорь вращается с частотой 1485 об/мин, магнитный поток $\Phi=0{,}05$ Вб. Определить э. д. с. машины, ток якоря, электромагнитный момент якоря и электромагнитную мощность машины при токе в каждой параллельной ветви обмотки якоря 10 А. Задачу решить для двух случаев: а) обмотка якоря параллельная; б) обмотка якоря последовательная.

4-3. Решить предыдущую задачу для обмотки якоря, состоящей из двухвитковых секций при прочих одинаковых условиях.

4-2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

4-4*. Генератор постоянного тока имеет обмотку возбуждения, сопротивление которой $r_в=213$ Ом, сопротивление цепи якоря $r_я=0{,}4$ Ом. Характеристика холостого хода при работе генератора с независимым возбуждением (рис. 4-4) представлена на рис. 4-6. На характеристике напряжение холостого хода и ток возбуждения указаны в процентах соответствующих значений при полном возбуждении: $E_в=264$ В и $I_{в.в}=1{,}24$ А. Определить, какое сопротивление реостата $r_р$ нужно ввести в цепь возбуждения, чтобы при параллельном возбуждении генератора (рис. 4-5) получить напряжение на его выводах в процентах $E_в$: 3, 45, 78, 90, 100. По полученным данным построить характеристику холостого хода генератора с параллельным возбуждением.

Анализ и решение

При холостом ходе и независимом возбуждении генератора ток якоря равен нулю и напряжение на его выводах равно э. д. с..

При параллельном возбуждении ток обмотки возбуждения проходит через якорь той же машины, поэтому напряжение на выводах генератора $U=E-I_в r_я$. При полном возбуждении, т. е. выведенном реостате в цепи возбуждения, $U=264-1{,}24 \cdot 0{,}4=264-0{,}5=263{,}5$ В,

что практ
холостом
возбужден
холостого
буждением

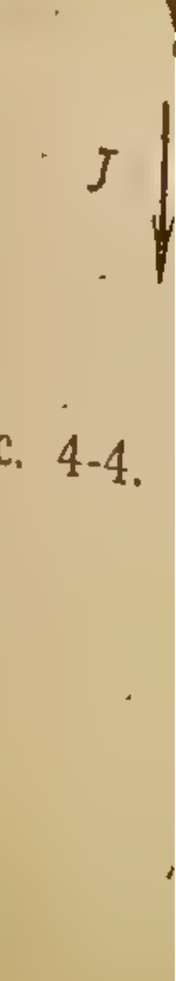


Рис. 4-4.

Процесс
остаточной
нии, равном
индуктируется
=7,9 В. При
действием этог
торый вызовет
водах генерато
Так как
дения $U=$
предста
к ос

что практически совпадает с э. д. с. Поэтому можно считать, что при холостом ходе напряжение на выводах генератора с параллельным возбуждением также равно э. д. с. Следовательно, характеристики холостого хода у генераторов с независимым и параллельным возбуждением должны быть одинаковыми.

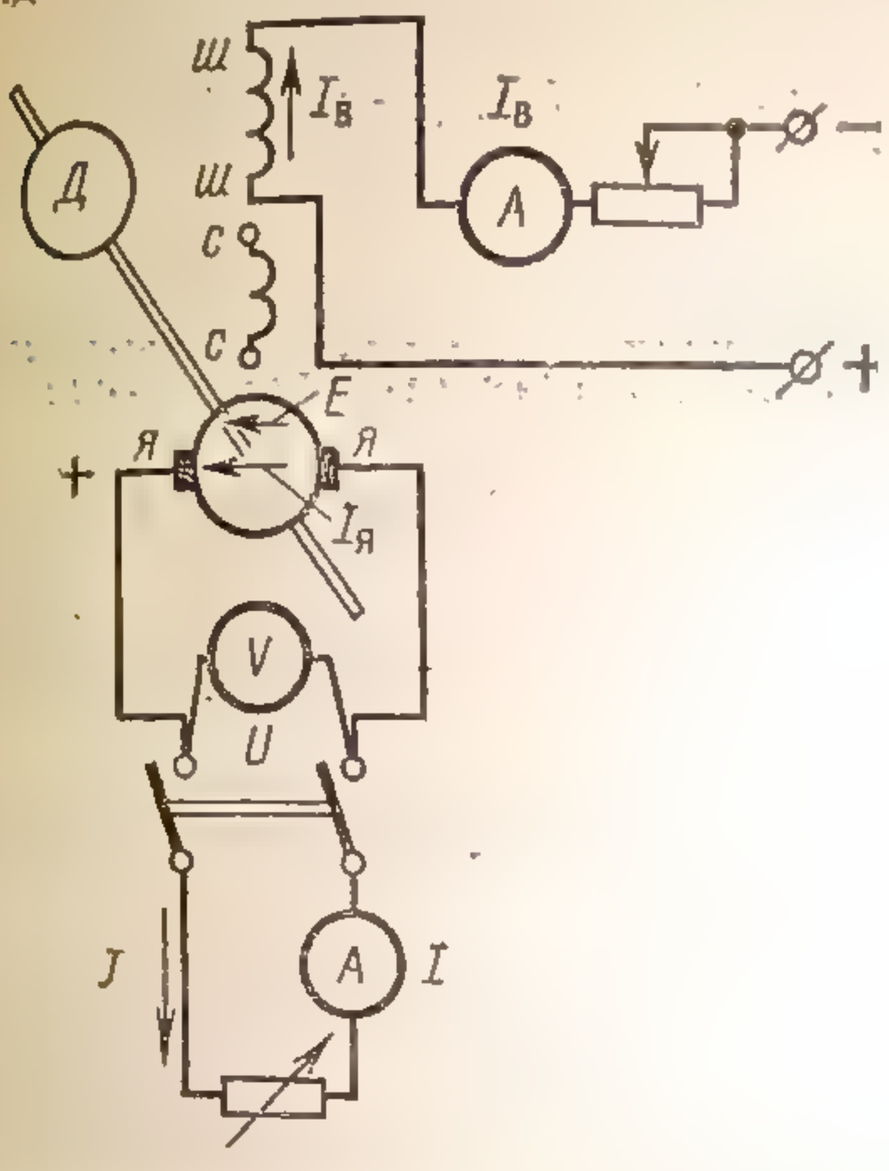


Рис. 4-4. К задачам 4-4, 4-5.

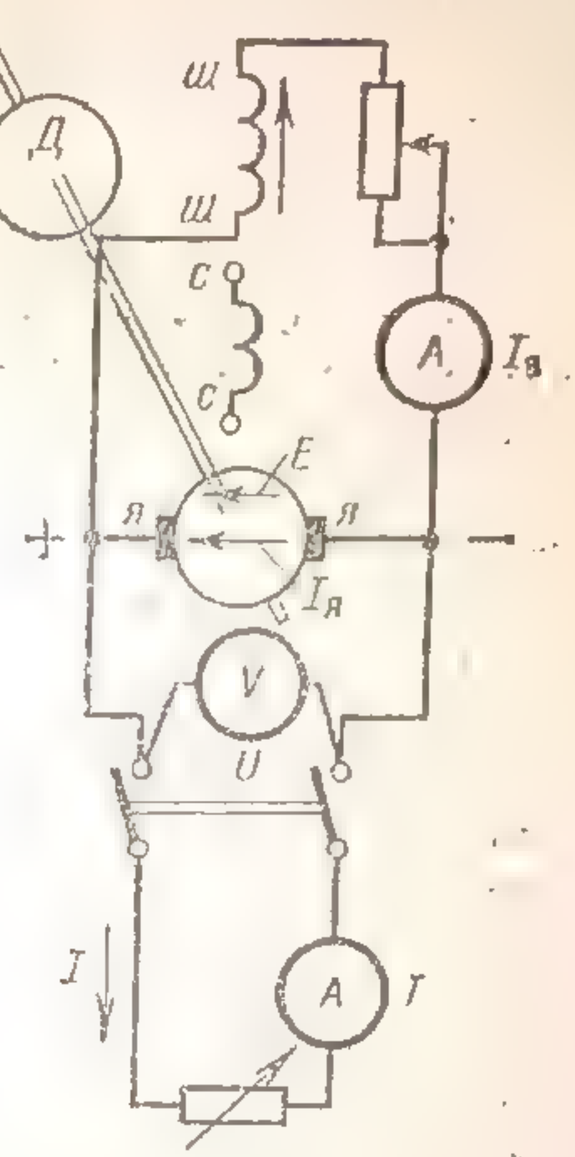


Рис. 4-5. К задачам 4-4, 4-5.

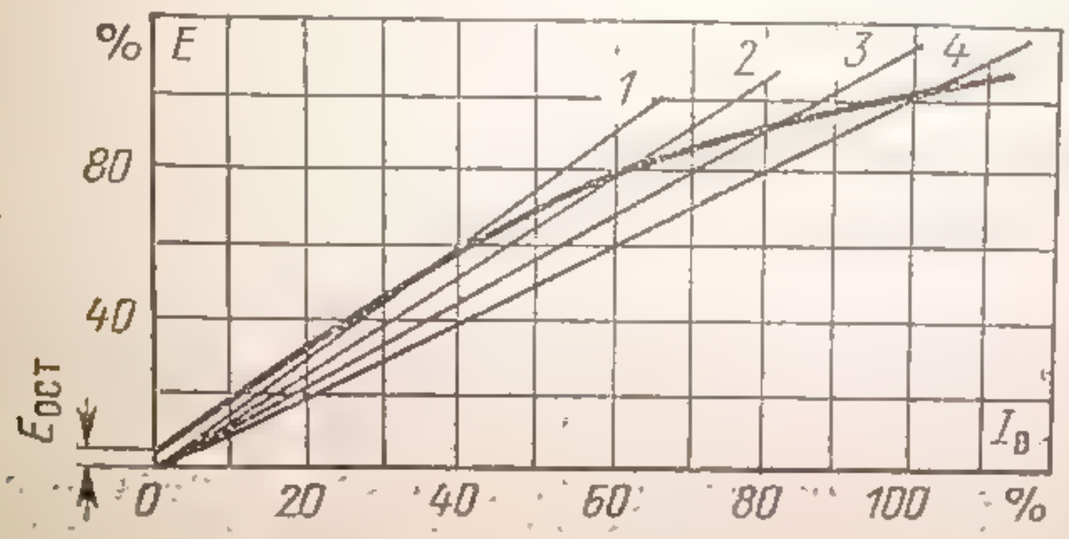


Рис. 4-6. К задаче 4-4.

Процесс самовозбуждения генератора происходит при наличии остаточной индукции. На рис. 4-6 показано, что при токе возбуждения, равном нулю (цепь возбуждения отключена, $r_р=\infty$), в якоре индуктируется э. д. с., составляющая 3% $E_н$, т. е. $E_{ост}=0{,}03\cdot 264=7{,}9$ В. При параллельном подключении цепи возбуждения под действием этой э. д. с. в цепи возбуждения будет протекать ток, который вызовет увеличение магнитного потока и напряжения на выводах генератора (процесс самовозбуждения).

Так как напряжение является линейной функцией тока возбуждения $U=I_в(r_в+r_р)$, то соответствующие зависимости могут быть представлены на рис. 4-6 прямыми *1*, *2*, *3*, *4*. Наклон каждой линии к оси абсцисс определяется сопротивлением цепи возбуждения $r_в+r_р$.

При $I \sim U$ ток возбуждения и напряжение будут увеличиваться. Когда напряжение сравняется с э. д. с. (точки пересечения характеристик), ток возбуждения и напряжение генератора достигнут установившихся значений.

Из характеристик видно, что напряжение достигнет 45% $E_{н\ при}$ токе возбуждения, равном 30% $I_{в.н}$, т. е. $U_1 = 118$ В, $I_{в1} = 0{,}372$ А.

Отсюда $r_в + r_р = \dfrac{118}{0{,}272} = 318$ Ом и $r_{р1} = 318 - 213 = 105$ Ом.

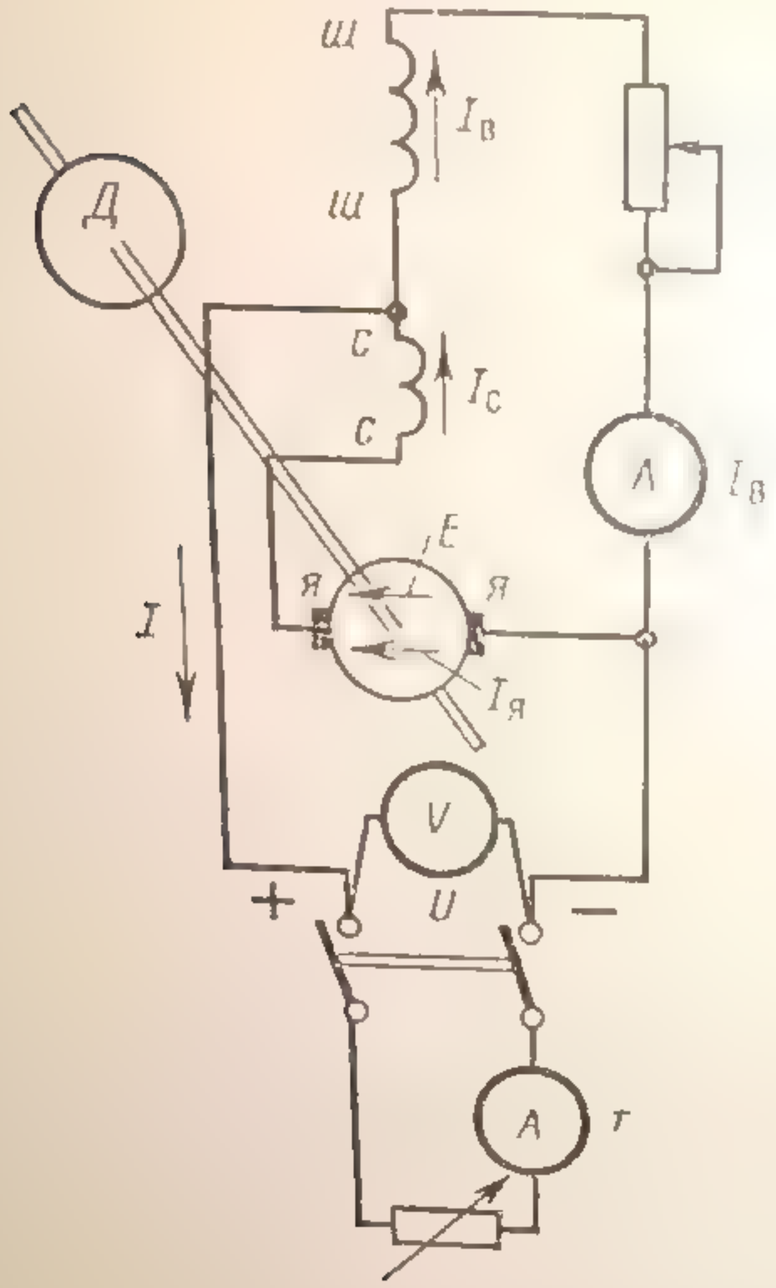


Рис. 4-7. К задаче 4-5.

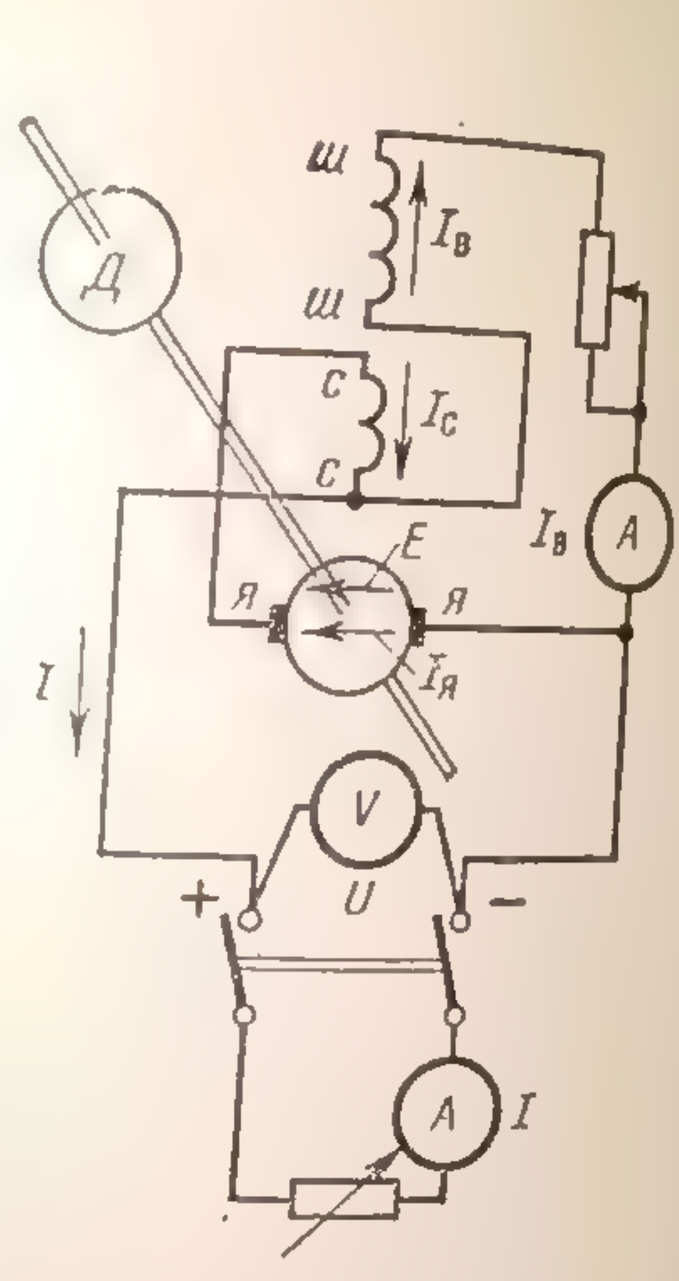


Рис. 4-8. К задаче 4-5.

Аналогично находим:

$U_2 = 205$ В (78%), $I_{в1} = 0{,}745$ А (60%), $r_{р2} = 63$ Ом;

$U_3 = 237$ В (90%), $I_{в3} = 0{,}995$ А (80%), $r_{р3} = 25$ Ом;

$U_4 = 264$ В (100%), $I_{в4} = 1{,}24$ А (100%), $r_{р4} = 0$.

4-5*. Генераторы серии П имеют две обмотки возбуждения на полюсах: одна соединяется с якорем параллельно и имеет большое сопротивление $r_в = 213$ Ом, другая соединяется с якорем последовательно и имеет малое сопротивление $r_с = 0{,}38$ Ом *. Сопротивление якоря $r_я = 0{,}4$ Ом**. Генератор может работать при независимом возбуждении (рис. 4-4), параллельном возбуждении (рис. 4-5), смешанном возбуждении (рис. 4-7 и 4-8). В последнем случае обмотки возбуждения могут быть соединены согласно рис. 4-7, когда токи в об-

* Индекс «с» означает сериесный, а слово сериесный — последовательно присоединенный.

** Сопротивление якоря $r_я$ включает в себя сопротивление обмотки якоря, переходных контактов под щетками, последовательно соединенной с якорем обмотки возбуждения добавочных полюсов. Добавочные полюсы устанавливаются между главными и служат для улучшения процесса коммутации тока щетками, снижая их искрение, вызываемое реакцией якоря.

мотках возбуждения создают магнитные потоки, направленные в одну сторону, и встречно (рис. 4-8), когда потоки направлены в разные стороны.

Характеристика холостого хода генератора представлена на рис. 4-9. Генератор с самовозбуждением при выведенном реостате в цепи возбуждения и постоянной частоте вращения якоря развивает максимальную э. д. с. $E_м=264$ В (100% по характеристике холостого хода). Посредством реостата в цепи возбуждения у генератора установлено напряжение, равное номинальному, $U_н=230$ В (100% по

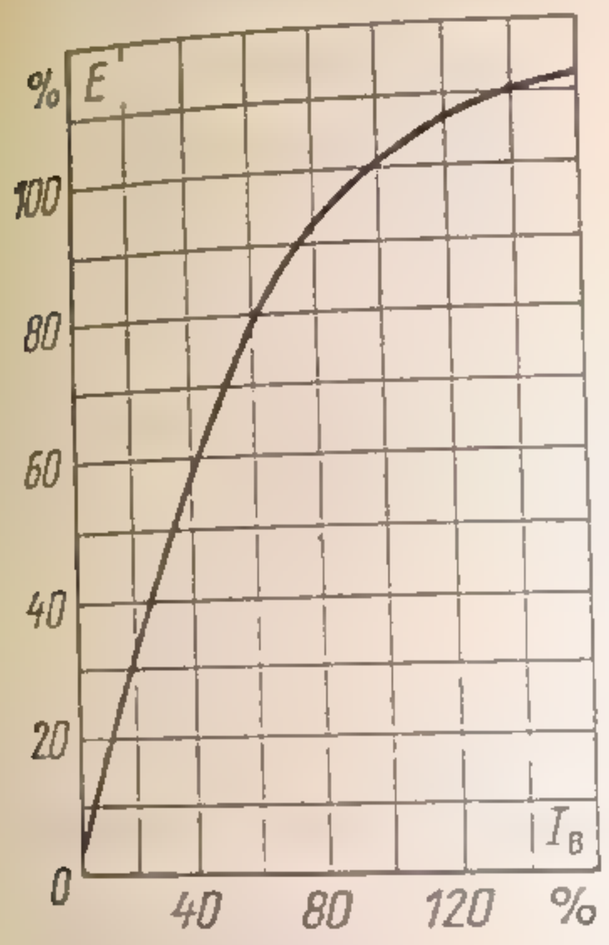


Рис. 4-9. К задаче 4-5.

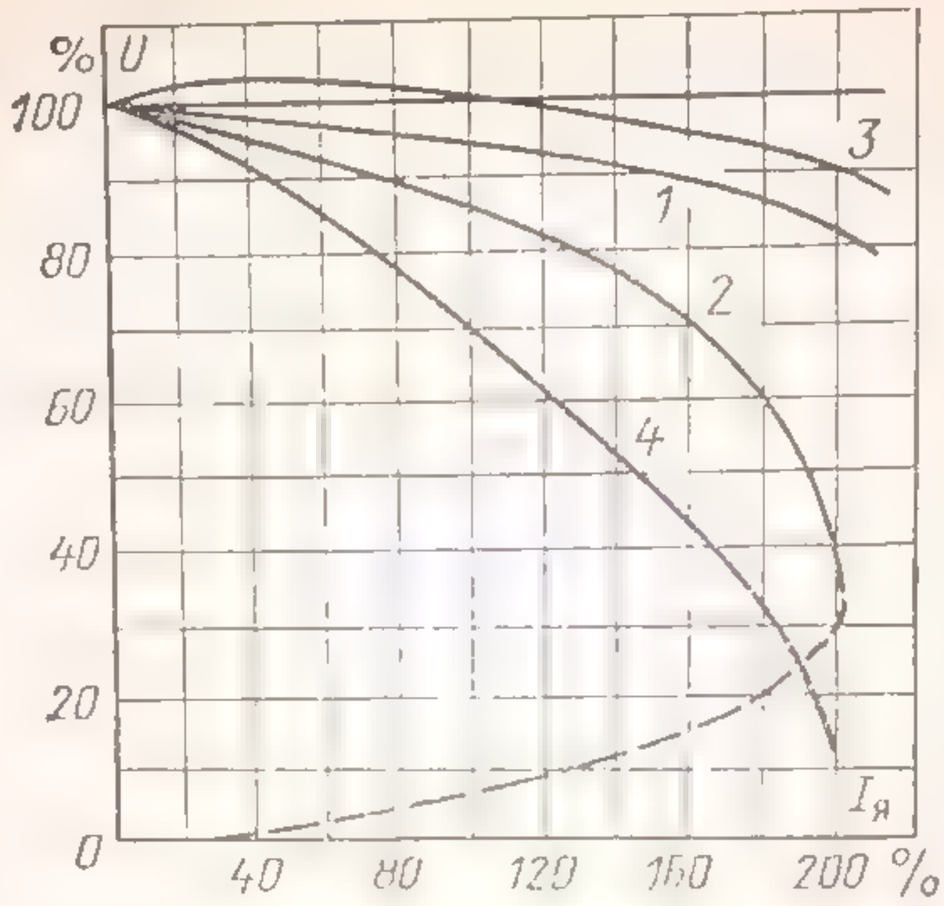


Рис. 4-10. К задаче 4-5.

внешним характеристикам). Внешние характеристики *1*, *2*, *3*, *4* (рис. 4-10) сняты при неизменном сопротивлении цепи возбуждения и соответствуют работе генератора при независимом, параллельном, смешанном согласном и смешанном встречном соединениях. Номинальный ток генератора $I_н=21{,}7$ А.

Условие 1. Пользуясь внешними характеристиками, определить для всех видов возбуждения э. д. с. генератора при холостом ходе и при номинальном токе якоря, изменение э. д. с. при переходе от холостого хода к номинальному току и установить, чем это изменение э. д. с. вызвано.

При номинальном токе якоря определить для генератора с самовозбуждением электрический к. п. д.

Анализ и решение

При холостом ходе ток нагрузки $I=0$. Поэтому э. д. с. для всех случаев возбуждения можно считать равной $U_н=230$ В (87% $E_м$). Этой э. д. с. по характеристике холостого хода (рис. 4-9) соответствует номинальный ток возбуждения $I_{в.н}$, составляющий 72% максимального тока возбуждения. Последний может быть определен из условия, что для генератора с самовозбуждением при выведенном реостате в цепи возбуждения

$$I_{в.макс}=\frac{E_{макс}}{r_в}=\frac{264}{213}=1{,}24\text{ А}.$$

Следовательно, $I_{в.н}=0{,}72I_{в.макс}=0{,}72\cdot1{,}24=0{,}9$ А. Отсюда номинальный ток якоря, устанавливаемый путем изменения нагрузочного сопротивления, будет $I_{я.н}=I+I_{в.н}=21{,}7+0{,}9=22{,}6$ А.

При номинальном токе якоря по внешним характеристикам определим $U_1=0{,}94\,U_н=216$ В, $U_2=0{,}85\,U_н=196$ В, $U_3=U_н=230$ В, $U_4=0{,}69\,U_н=158$ В (индексы напряжений соответствуют внешним характеристикам на рис. 4-10).

Падение напряжения в цепи якоря при различных видах возбуждения

$$U_{0.1}=U_{0.2}=I_{я.н}r_я=22{,}6\cdot0{,}4=9\text{ В};$$

$$U_{0.3}=U_{0.4}=I_{ян}(r_я+r_с)=22{,}6\cdot0{,}78=17{,}6\text{ В}.$$

Электродвижущая сила генератора: $E_1=U_1+U_{0.1}=216+9=225$ В; $E_2=U_2+U_{0.2}=196+9=205$ В; $E_3=U_3+U_{0.3}=230+17{,}6=247{,}6$ В; $E_4=U_4+U_{0.4}=158+17{,}6=175{,}6$ В.

Во всех случаях напряжение на выводах генератора $U=E-U_р$. При неизменной э. д. с. напряжение является линейной функцией тока якоря, так как падение напряжения пропорционально току якоря. Но в действительности э. д. с. не остается постоянной.

При независимом возбуждении э. д. с. уменьшается под действием реакции якоря на $\Delta E_1=E_0-E_1$, где E_0 — э. д. с. при холостом ходе; $\Delta E_1=230-225=5$ В.

При параллельном возбуждении уменьшение э. д. с. происходит под действием реакции якоря и частичного размагничивания машины вследствие уменьшения напряжения, а следовательно, и тока в параллельной обмотке возбуждения $\Delta E_2=E_0-E_2=230-205=25$ В.

При смешанном согласном возбуждении и номинальном напряжении действие последовательной намагничивающей обмотки возбуждения компенсирует уменьшение э. д. с., которое имело бы место при одном параллельном возбуждении. Поэтому э. д. с. получается большей, чем при холостом ходе,

$$\Delta E_3=E_0-E_3=230-247{,}6=-17{,}6\text{ В}.$$

При смешанном встречном возбуждении уменьшение э. д. с. происходит под действием реакции якоря и размагничивания машины от встречного потока последовательной обмотки возбуждения и за счет уменьшения тока в параллельной обмотке возбуждения

$$\Delta E_4=E_0-E_4=230-175{,}6=54{,}4\text{ В}.$$

Электрический к. п. д. генератора (без учета механических потерь, покрываемых первичным двигателем) определится из уравнения энергетического баланса.

Для замкнутой цепи генератора постоянного тока с самовозбуждением по второму закону Кирхгофа имеем $E=I_л(r_я+r_с)+U$. Умножив обе части равенств на $I_л$, получим $EI_л=I_я^2(r_л+r_с)+UI_я$; $EI_л=I_я^2(r_л+r_с)+U(I+I_в)$. Раскрывая скобки, будем иметь уравнение баланса мощностей $EI_л=UI+I_я^2(r_л+r_с)+UI_в$ или $P_{элм}=P+P_{м.я}+P_в$, где $P_{элм}=EI_л$ — электромагнитная мощность генератора; $P=UI$ — мощность, переданная потребителю; $P_в=UI_в$ — мощность потерь на нагрев в цепи возбуждения; $P_{м.я}=I_я^2(r_л+r_с)$ — мощность потерь на нагрев в цепи якоря. Электрический к. п. д. выразится $\eta_{э\%}=\dfrac{P}{P_{элм}}100$

Предварительно определим установленное сопротивление реостата, включенного в цепь параллельной обмотки возбуждения.

При холостом ходе номинальное напряжение на выводах генератора $U_0 = U_н = 230$ В устанавливается при токе возбуждения $I_{в.н} = 0{,}9$ А. Следовательно, $U_0 = U_в = I_{в.н}(r_в + r_р)$, откуда сопротивление реостата $r_р = U_0/I_{в.н} - r_в = 230/0{,}9 - 213 = 257 - 213 = 44$ Ом.

При номинальном токе якоря для генератора с параллельным возбуждением $E = 205$ В, $U = 196$ В ток возбуждения $I_в = \dfrac{U}{r_в + r_р} = \dfrac{196}{213+44} = 0{,}77$ А, ток нагрузки $I = I_{я.н} - I_в = 22{,}6 - 0{,}77 = 21{,}8$ А; $P_{элм} = EI_я = 205 \cdot 22{,}6 = 4640$ Вт; $P = UI = 196 \cdot 21{,}8 = 4280$ Вт и электрический к. п. д. $\eta_э = \dfrac{P}{P_{элм}} 100 = \dfrac{4280}{4640} 100 = 92{,}5\%$.

Для генератора со смешанным согласным возбуждением, проделав аналогичный расчет, получим:

$$E = 247{,}6 \text{ В}; \quad U = 230 \text{ В}; \quad I_в = 0{,}9 \text{ А}; \quad I = 21{,}7 \text{ А};$$

$$P_{элм} = 5600 \text{ Вт}; \quad P = 5000 \text{ Вт}; \quad \eta_э = 90\%.$$

Для генератора со смешанным встречным возбуждением $E = 175{,}6$ В; $U = 158$ В; $I_в = 0{,}62$ А; $I = 22$ А; $P_{элм} = 3960$ Вт; $P = 3480$ Вт; $\eta_э = 88\%$.

Условие 2. Определить, какими должны быть э. д. с. и ток возбуждения при холостом ходе генератора, чтобы при номинальном токе напряжение генератора было равно номинальному.

При переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу выраженное в процентах относительное изменение напряжения составляет: для генератора с независимым возбуждением 6%, с параллельным возбуждением 15%, со смешанным согласным возбуждением 0% и со смешанным встречным соединением 31%.

Анализ и решение

Относительное изменение напряжения в процентах номинального выразится $\Delta U_\% = \dfrac{U_{х.х} - U_н}{U_н} 100$.

Отсюда напряжение холостого хода, равное э. д. с. генератора, $U_{х.х} = E_{х.х} = U_н + \dfrac{\Delta U_\% \, U_н}{100}$. Подставляя числовые данные, получаем:

для генератора с независимым возбуждением

$$E_{х.х} = 230 + \frac{6 \cdot 230}{100} = 230 + 13{,}8 = 243{,}8 \text{ В } (92\%);$$

этой э. д. с. по характеристике холостого хода (рис. 4-9) соответствует ток возбуждения $I_в = 0{,}99$ А (80%);

для генератора с параллельным возбуждением

$$E_{х.х} = 230 + \frac{15 \cdot 230}{100} = 230 + 34 = 264 \text{ В } (100\%);$$

$$I_в = 1{,}24 \text{ А } (100\%);$$

для генератора со смешанным согласным возбуждением

$$E_{х.х} = 230\ \text{В}\ (87{,}5\%);\quad I_{в} = 0{,}9\ \text{А}\ (73\%);$$

для генератора со смешанным встречным возбуждением

$$E_{х.х} = 230 + \frac{31 \cdot 230}{100} = 230 + 71{,}5 = 301{,}5\ \text{В}\ (114\%),$$

$$I_{в} = 2{,}36\ \text{А}\ (190\%).$$

Из выполненных расчетов следует, что если установить при холостом ходе напряжение генератора равным номинальному (230 В), то при увеличении нагрузки до номинальной у генератора с независимым и параллельным возбуждением напряжение можно поддерживать неизменным посредством уменьшения сопротивления реостата в цепи возбуждения. У генератора со смешанным согласным возбуждением напряжение поддерживается автоматически за счет действия последовательной намагничивающей обмотки возбуждения. У генератора со смешанным встречным возбуждением даже при выведенном реостате в цепи возбуждения напряжение будет меньше номинального, так как при заданных условиях максимальный ток возбуждения (1,24 А) меньше требуемого (2,36 А).

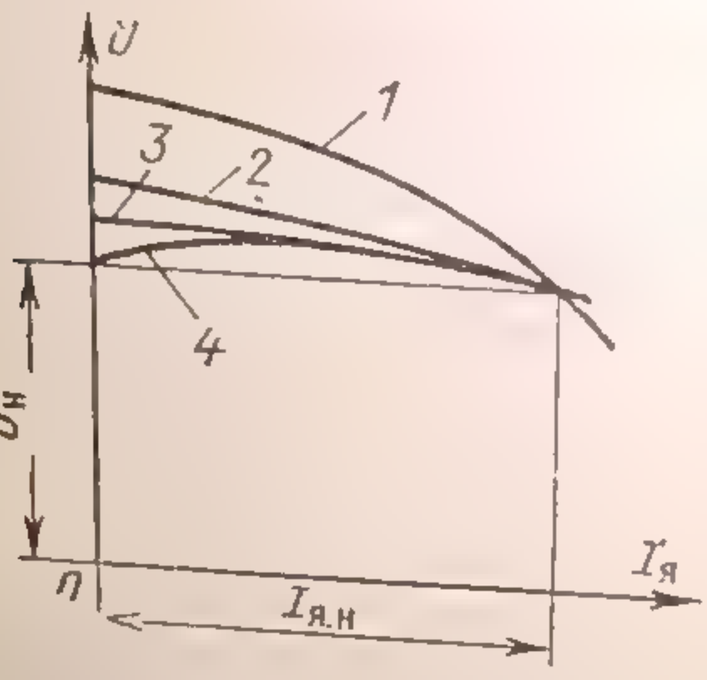


Рис. 4-11. К задачам 4-4, 4-5.

Вопросы и упражнения к задачам 4-4, 4-5**

1. В условиях задачи 4-5 (условие 1), пользуясь внешними характеристиками (рис. 4-10), определить напряжение, э. д. с. и ток в параллельной обмотке возбуждения при $I_я = 2I_{я.н}$ и напряжении холостого хода $U_{х.х} = 230$ В для случаев: а) независимого возбуждения; б) параллельного возбуждения; в) смешанного согласного возбуждения и г) смешанного встречного возбуждения

2. Решить предыдущую задачу при $I_я = 0{,}5\ I_{я.н}$

3. Для генератора с параллельным возбуждением, пользуясь внешней характеристикой (рис. 4-10), определить ток и. э. д. с. при коротком замыкании генератора, если номинальный ток якоря $I_{я.н} = 22{,}6$ А и сопротивление цепи якоря $r_я = 0{,}4$ Ом.

4. На рис. 4-11 изображены внешние характеристики генератора постоянного тока, у которого при номинальном токе якоря (100%) напряжение также равно номинальному (100%). Определить, какая из характеристик, отмеченных цифрами 1—4, относится к генератору:
а) с независимым возбуждением;
б) с параллельным возбуждением;
в) с последовательным согласным возбуждением и
г) с последовательным встречным возбуждением.

4-6. Генератор постоянного тока при токе нагрузки 25 А развивает э. д. с. 125 В; сопротивление цепи якоря 0,38 Ом. Определить э. д. с. генератора при увеличении нагрузочного тока вдвое и как

нужно изменить э. д. с. генератора, чтобы напряжение при этом осталось неизменным.

Условие 1. Задачу решить для генератора с независимым возбуждением, у которого при увеличении нагрузки вдвое и том же токе возбуждения напряжение снижается на 13% первоначального.

Условие 2. Задачу решить для генератора с параллельным возбуждением, у которого при нагрузочном токе 25 А ток возбуждения 1,4 А, а при увеличении нагрузочного тока вдвое напряжение снижается на 25% первоначального.

4-7. Генераторы постоянного тока серии П характеризуются данными, представленными в таблице. При номинальной нагрузке генераторы работают с номинальным напряжением $U_н$.

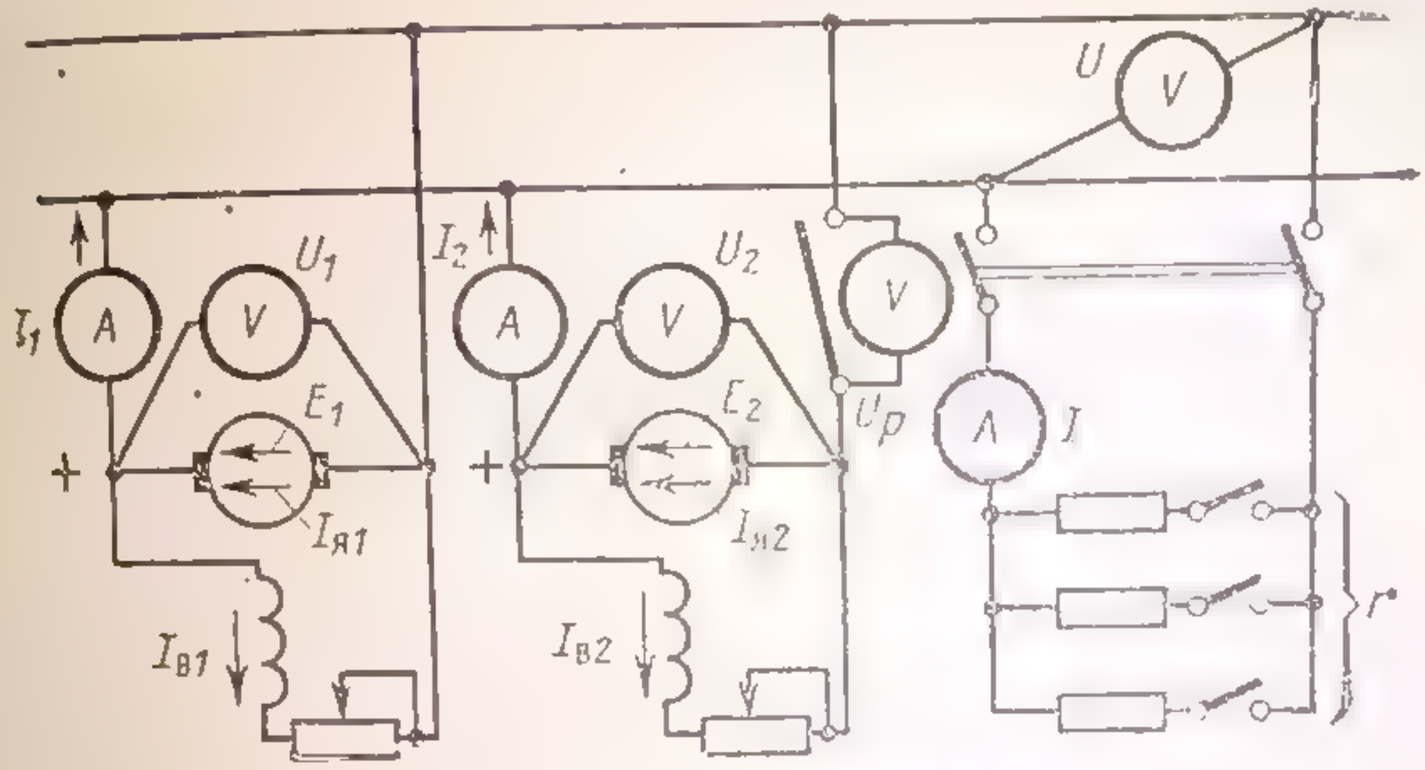


Рис. 4-12. К задаче 4-9

Определить для указанных генераторов номинальный ток $I_п$, ток в параллельной обмотке возбуждения $I_в$, ток якоря $I_я$, э. д. с. генератора E, электромагнитную мощность $P_{эм}=EI_я$, мощность электрических потерь $P_{эл}$ и электрический к. п. д. $\eta_э$.

№ п/п.	Номинальная мощность генератора $P_н$, кВт	Номинальное напряжение $U_н$, В	Сопротивление цепи якоря $r_я$, Ом	Сопротивление параллельной цепи возбуждения $r_в$, Ом	Частота вращения n, об/мин
1	0,5	230	8,6	1060	1450
2	0,8	115	1,1	212	1450
3	1,4	230	2,08	608	2850
4	1,9	115	0,324	132	2850
5	15,0	115	0,034	212	2850
6	27,0	230	0,0765	47	1450

4-8. Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением работает при номинальной нагрузке $P_н=6{,}2$ кВт с номинальным напряжением $U_н=115$ В. Электрический к. п. д. генератора $\eta_э=0{,}91$.

Определить электромагнитную мощность генератора, номинальный ток генератора, ток якоря, ток в параллельной обмотке возбуждения, сопротивление цепи якоря, сопротивление цепи возбуждения и э. д. с. генератора. Мощность потерь в цепи якоря принять равной мощности потерь в параллельной цепи возбуждения.

4-9. Два генератора с параллельным возбуждением имеют сопротивления якоря $r_{я1}=0{,}4$ Ом, $r_{я2}=0{,}6$ Ом. Генератор второй включается параллельно на общие шины с генератором первым при отключенной нагрузке и показании вольтметров $U_1=U_2=245$ В, $U_р=0$ (рис. 4-12).

При включении нагрузки показания приборов оказались: $U=230$ В, $I_1=30$ А, $I_2=20$ А.

Определить:

1) электродвижущую силу обоих генераторов при параллельной работе;

2) как нужно изменить э. д. с. первого и второго генераторов E_1 и E_2, чтобы та же нагрузка (ток потребителя I) распределялась между обоими генераторами следующим образом: а) $I_1=I_2$; б) $I_1=0$; в) $I_2=0$.

За малостью токов в обмотках возбуждения считать ток якоря каждого генератора равным его нагрузочному току.

4-3. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

4-10*. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 4-13) работает при напряжении $U=220$ В и токе в цепи питания $I=12$ А и имеет при этом частоту вращения $n=1500$ об/мин. Сопротивление цепи якоря двигателя $r_я=0{,}83$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $r_в=440$ Ом. При холостом ходе и том же приложенном напряжении частота вращения двигателя возрастет до $n_0=1560$ об/мин. Определить подводимую к двигателю мощность P_1, механическую мощность $P_{мех}$, мощность на валу двигателя P_2 и к. п. д. η. Определить также вращающий момент $M_{вр}$, приложенный к якорю, момент нагрузки на валу M и момент холостого хода M_0.

Анализ и решение

Механическая мощность двигателя получится, если из подводимой мощности вычесть мощности электрических потерь энергии на нагрев обмотки возбуждения $P_в$ и обмотки якоря $P_я$, т. е. $P_{мех}=P_1-P_в-P_я$. С другой стороны, $P_1=UI=U(I_я+I_в)$, $P_в=UI_в$ и $P_я=I_я^2 r_я$. Следовательно, $P_{мех}=U(I_я+I_в)-UI_в-I_я^2 r_я$. Раскрывая скобки, получим окончательно $P_{мех}=UI_я-I_я^2 r_я$.

При холостом ходе механическая мощность $P_0=UI_{я0}-I_я^2 r_я$ расходуется на покрытие механических и магнитных потерь в самом двигателе и зависит главным образом от частоты вращения якоря. Для двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, обладающего жесткой механической характеристикой, скорость мало зависит от нагрузки при изменении ее в широких пределах, поэтому мощность механических и магнитных потерь можно считать практически постоянной и равной механической мощности двигателя при холостом ходе.

Тогда мощность двигателя на валу P_2 выразится:

$$P_2 = P_{мех} - P_0 = \left(UI_я - I_я^2 r_я\right) - \left(UI_{я0} - I_{я0}^2 r_я\right).$$

Вращающий момент двигателя и момент двигателя на валу связаны с соответствующими мощностями уравнениями $M_{вр}=P_{мех}/\omega$ и $M=P_2/\omega$, где $\omega=2\pi n/60$ — угловая скорость двигателя. Подставляя выражение ω в уравнения моментов, получаем

$$M_{вр}=\frac{P_{мех}\cdot 60}{2\pi n}=9{,}55\frac{P_{мех}}{n}\text{ Н·м и }M=9{,}55\frac{P_2}{n}\text{ Н·м.}$$

И, наконец, к. п. д. двигателя

$$\eta\%=\frac{P_2}{P_1}100.$$

Пользуясь выведенными формулами, можно теперь найти требуемые значения.

Мощность, подводимая к двигателю, $P_1=UI=220\cdot 123\times\times 10^{-3}=2{,}64$ кВт. Ток в обмотке возбуждения двигателя

$$I_в=\frac{U}{r_в}=\frac{220}{440}=0{,}5\text{ А.}$$

Ток якоря двигателя при нагрузке $I_я=I-I_в=12-0{,}5==11{,}5$ А. Механическая мощность двигателя $P_{мех}=UI_я-I_я^2 r_в=220\cdot 11{,}5-11{,}5^2\cdot 0{,}83=2430$ Вт$=2{,}43$ кВт.

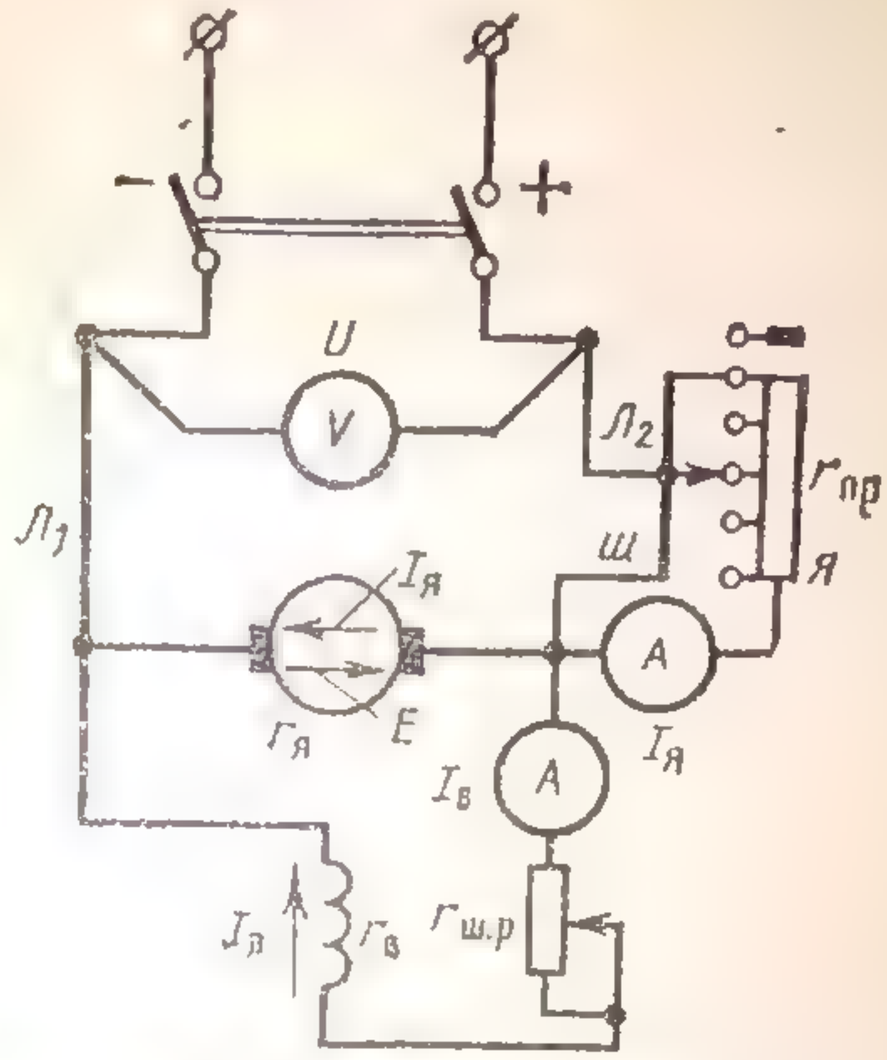


Рис. 4-13. К задачам 4-10, 4-13, 4-14, 4-15, 4-16.

При вращении якоря двигателя в его обмотке индуктируется противо-э. д. с., которая меньше приложенного напряжения на падение напряжения в цепи якоря, $E=U-I_я r_я$.

Так как $E=k_e\Phi n$, то частота вращения

$$n=\frac{U-I_я r_я}{k_e\Phi}.$$

Из того же уравнения следует, что

$$I_я=\frac{U-E}{r_я}.$$

В момент пуска $E=k_e n\Phi=0$ и $I_{я.пуск}=U/r_я$ достигает наибольшего значения. Для ограничения пускового тока последовательно в цепь якоря вводится пусковой реостат, который по мере разгона двигателя постепенно выводится. При установившейся частоте вращающий момент $M_{вр}$, приложенный к якорю, должен уравновешивать тормозной момент $M_т$, складывающийся из момента нагрузки на валу M и момента M_0, обусловленного трением, т. е. $M_{вр}=M_т=M+M_0=k_м\Phi I_я$. Для двигателя с параллельным возбуждением магнитный поток можно считать приблизительно постоянным, не зависящим от нагрузки, следовательно, ток якоря пропорционален тормозному моменту и при прочих одинаковых условиях исключительно определяется механической нагрузкой двигателя.

При $M_{вр} > M_т$ (условие пуска) частота вращения n и противо-э. д. с. E увеличиваются, а ток якоря $I_я$ уменьшается до тех пор, пока $M_{вр}$ не сравняется с $M_т$. При увеличении нагрузки $M_{вр} < M_т$, n и E уменьшаются, $I_я$ увеличивается, пока снова не наступит равенство $M_{вр} = M_т$. Наибольший ток якоря получится при полностью заторможенном якоре, наименьший — при холостом ходе, когда момент нагрузки $M = 0$.

Для определения тока якоря при холостом ходе воспользуемся формулами для частоты вращения двигателя при нагрузке

$$n = \frac{U - I_я r_я}{k_e \Phi}$$

и при холостом ходе $n_0 = \frac{U - I_{я0} r_я}{k_e \Phi}$. Магнитный поток Φ в обоих случаях считаем неизменным. Взяв отношение частот вращения, получим

$$\frac{n}{n_0} = \frac{U - I_я r_я}{U - I_{я0} r_я}.$$

Подставляя известные значения, будем иметь

$$\frac{1500}{1560} = \frac{220 - 11{,}5 \cdot 0{,}83}{220 - I_{я0} \cdot 0{,}83}.$$

Отсюда $I_{я0} = 1{,}2$ А, а ток двигателя при холостом ходе $I_0 = I_{я0} + I_в = 1{,}2 + 0{,}5 = 1{,}7$ А.

Определим механическую мощность двигателя при холостом ходе $P_0 = UI_{я0} - I_{я0}^2 r_я = 220 \cdot 1{,}2 - 1{,}2^2 \cdot 0{,}83 = 264$ Вт.

Мощность двигателя на валу будет $P_2 = P_{мех} - P_0 = 2{,}17$ кВт.

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 = \frac{2{,}17}{2{,}64} 100 = 83\%.$$

Теперь определим моменты двигателя.

Вращающий электромагнитный момент двигателя при нагрузке

$$M_{вр} = 9{,}55 \frac{P_{мех}}{n} = 9{,}55 \frac{2430}{1500} = 15{,}4 \text{ Н·м};$$

при холостом ходе

$$M_0 = 9{,}55 \frac{264}{1560} = 1{,}6 \text{ Н·м};$$

момент нагрузки

$$M = 9{,}55 \frac{P_2}{n} = 9{,}55 \frac{2170}{1500} = 13{,}8 \text{ Н·м}.$$

Вопросы и упражнения к задаче 4-10

1. По данным задачи 4-10 определить:

а) пусковой ток двигателя при непосредственном включении его в сеть без реостата;

б) каким должно быть сопротивление пускового реостата, включенного последовательно в цепь якоря двигателя (рис. 4-13), чтобы пусковой ток был в 2 раза больше тока, указанного в задаче;

в) какой частоты вращения достигает двигатель, если по мере его разгона сопротивление пускового реостата полностью вывести;

г) какой частоты вращения достигает двигатель, если при полной нагрузке на валу сопротивление пускового реостата $r_{п.р}=8{,}5$ Ом оставить включенным;

д) какой частоты вращения достигнет двигатель, если при полностью выведенном сопротивлении реостата в цепи якоря нагрузку (ток якоря) в 2 раза увеличить.

2. Двигатель постоянного тока имеет тормозной момент при холостом ходе $M_0=1$ кгс·м. Момент нагрузки $M=9$ кгс·м, ток якоря $I_я=20$ А. Определить ток якоря, если нагрузку (момент на валу) увеличить в 2 раза.

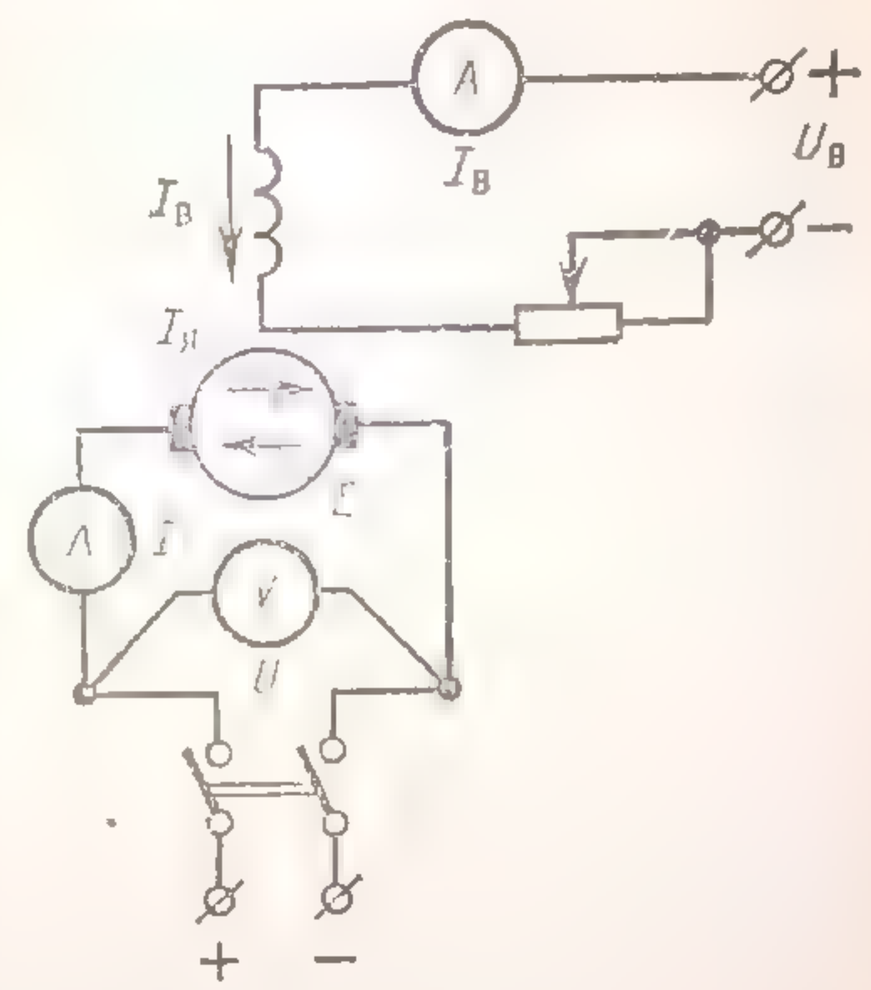


Рис. 4-14. К задаче 4-11.

3. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет сопротивление якоря 0,4 Ом. При токе якоря 25 А и напряжении 220 В двигатель имеет частоту вращения 1500 об/мин. Путем введения реостата в цепь якоря частоту вращения двигателя (об/мин) можно уменьшить до а) 1140; б) 785; в) 430 и г) 0. Определить, до какого из указанных значений уменьшится частота вращения двигателя, если в цепь якоря ввести сопротивление реостата 6; 8,4 Ом. Ток якоря двигателя считать неизменным.

4. Решить предыдущую задачу для двигателя с независимым возбуждением при уменьшении напряжения, подводимого к якорю от постороннего источника питания, до: а) 120 В, б) 170 В.

4-11. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет сопротивление якоря $r_я=0{,}25$ Ом. Частота вращения двигателя при номинальной нагрузке $n=3000$ об/мин, номинальный ток якоря двигателя $I_{я.н}=24$ А, напряжение $U=110$ В.

Считать ток якоря пропорциональным нагрузке, определить частоту вращения двигателя, мощность потерь в цепи якоря и противо-э. д. с. двигателя при следующих условиях:

а) если нагрузку в 2 раза увеличить;

б) если нагрузку в 2 раза уменьшить;

в) при холостом ходе ($I_{я0}=0$);

г) если при той же нагрузке последовательно в цепь якоря включить реостат $r_р=2{,}25$ Ом;

д) если при независимом возбуждении двигателя (рис. 4-14) и той же нагрузке напряжение, подводимое к якорю от отдельного источника питания с регулируемым напряжением, уменьшить на 20%;

е) если при неизменном тормозном моменте $M_т=M_{вр}=k_м\Phi I_я$ магнитный поток уменьшить в 1,5 раза, уменьшив ток возбуждения посредством реостата в цепи возбуждения.

4-12. Двигатели постоянного тока единой серии П имеют технические данные, указанные в таблице. Определить подводимую к двигателю мощность P_1, механическую мощность $P_{мех}$, мощность потерь в обмотке якоря $P_{о.я}$, мощность потерь на нагрев обмотки возбуждения $P_в$, мощность механических потерь P_0, к. п. д. двигателя η и произвести проверку баланса мощностей. Определить также вращающий момент, приложенный к якорю $M_{вр}$, момент нагрузки на валу M и момент холостого хода M_0.

Двигатель работает при параллельном возбуждении.

№ п/п.	Номинальная мощность, кВт	Напряжение, В	При номинальной нагрузке		Сопротивление	
			Частота вращения, об/мин	Ток двигателя, А	якоря, Ом	возбуждения, Ом
1	19,0	220	1500	102	0,1	55
2	8,0	110	1000	86	0,05	32
3	6,0	220	1500	33	0,3	149
4	2,2	110	750	27	0,3	62,5
5	1,0	220	3000	5,9	2,0	645
6	0,3	110	1000	3,8	2,4	405

4-13. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением допускает увеличение частоты вращения путем ослабления магнитного поля. Введением реостата в цепь возбуждения (рис. 4-13) магнитный поток уменьшают в 1,5 раза. Определить: а) как изменяется ток якоря, частота вращения двигателя, механическая мощность и к. п. д. при неизменном тормозном моменте $M_т = M_{вр}$; б) как изменяются ток якоря, частота вращения двигателя, вращающий момент и к. п. д. при неизменной механической мощности двигателя.

Технические данные двигателя представлены в таблице к задаче 4-12. При определении к. п. д. пренебречь за малостью током в обмотке возбуждения, а мощность механических потерь считать в первом приближении пропорциональной частоте вращения двигателя.

4-14. Определить сопротивление регулировочного реостата и к. п. д. двигателя, технические данные которого приведены в таблице задачи 4-12, если при неизменной нагрузке (ток якоря) частота вращения снижается в 1,5 раза путем введения сопротивления реостата в цепь якоря (рис. 4-13). При определении к. п. д. мощность механических потерь считать в первом приближении пропорциональной частоте вращения двигателя.

4-15. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 4-13) при номинальном напряжении 220 В и номинальном токе якоря 131 А имеет частоту вращения 750 об/мин. Сопротивление цепи якоря $r_я = 0{,}02$ Ом. При пуске двигателя последовательно в цепь якоря вводится реостат, сопротивление которого выбирается так, чтобы пусковой ток якоря двигателя был в 2 раза больше номинального. Определить вращающий момент двигателя при номинальном и пусковом токах и отношение моментов.

Определить также частоту вращения двигателя при холостом ходе и выведенном сопротивлении пускового реостата, пренебрегая за малостью током холостого хода якоря. Магнитный поток считать постоянным.

4-16. Двигатель постоянного тока работает при напряжении 220 В и при номинальном токе 102 А имеет частоту вращения 750 об/мин. Сопротивление обмотки якоря $r_я = 0{,}03$ Ом, сопротивление последовательной обмотки возбуждения $r_с = 0{,}02$ Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $r_в = 110$ Ом.

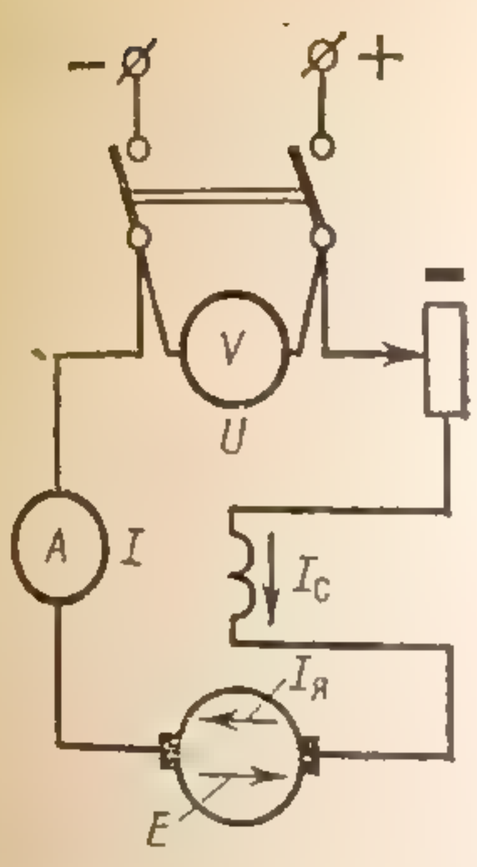


Рис. 4-15. К задаче 4-16.

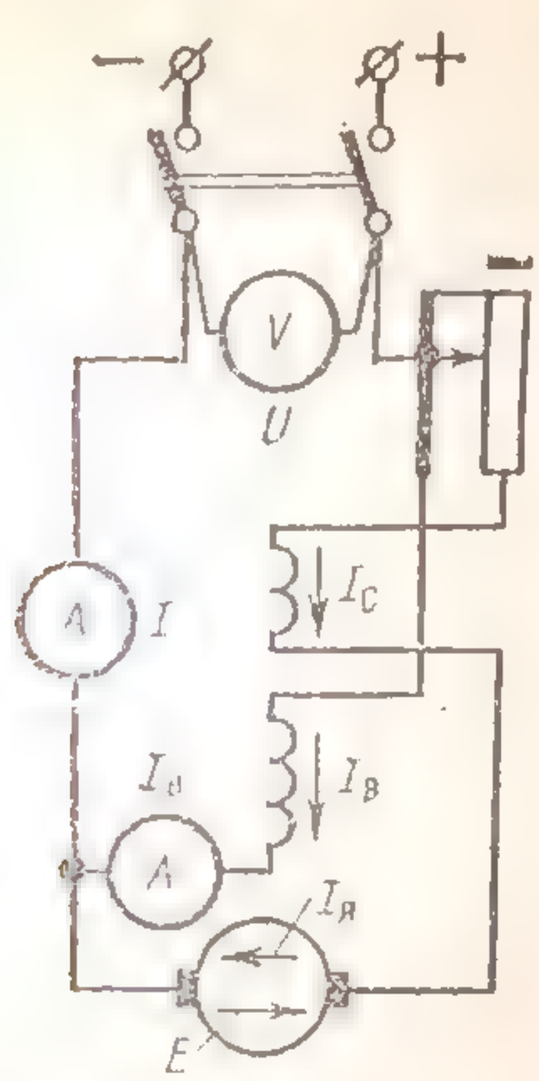


Рис. 4-16. К задаче 4-16.

Пренебрегая действием реакции якоря, определить частоту вращения двигателя, если при изменении его нагрузки: а) ток якоря двигателя в 1,5 раза увеличится; б) ток якоря двигателя в 1,5 раза уменьшится; в) ток якоря уменьшится до нуля (холостой ход);

Условие 1. Двигатель с параллельным возбуждением (рис. 4-13). Последовательная обмотка возбуждения не используется.

Условие 2. Двигатель с последовательным возбуждением (рис. 4-15). Параллельная обмотка возбуждения не используется. Магнитный поток двигателя считать пропорциональным току якоря, а при холостом ходе за счет остаточной индукции магнитный поток принять равным 3% потока при номинальном токе якоря.

Условие 3. Двигатель со смешанным возбуждением (рис. 4-16). Магнитный поток, создаваемый током в последовательной обмотке возбуждения, считать пропорциональным этому току, а при номинальном токе якоря принять равным 0,5 магнитного потока, создаваемого током в параллельной обмотке.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5-1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН. ЧАСТОТА, ФАЗА, СДВИГ ФАЗ

5-1*. В равномерном магнитном поле с индукцией $B=0{,}212$ Т прямоугольная рамка вращается с частотой $n=3000$ об/мин (рис. 5-1, *а* и *б*). Ширина рамки $d=100$ мм; активная длина проводов рамки $l=150$ мм; число витков рамки $w=100$.

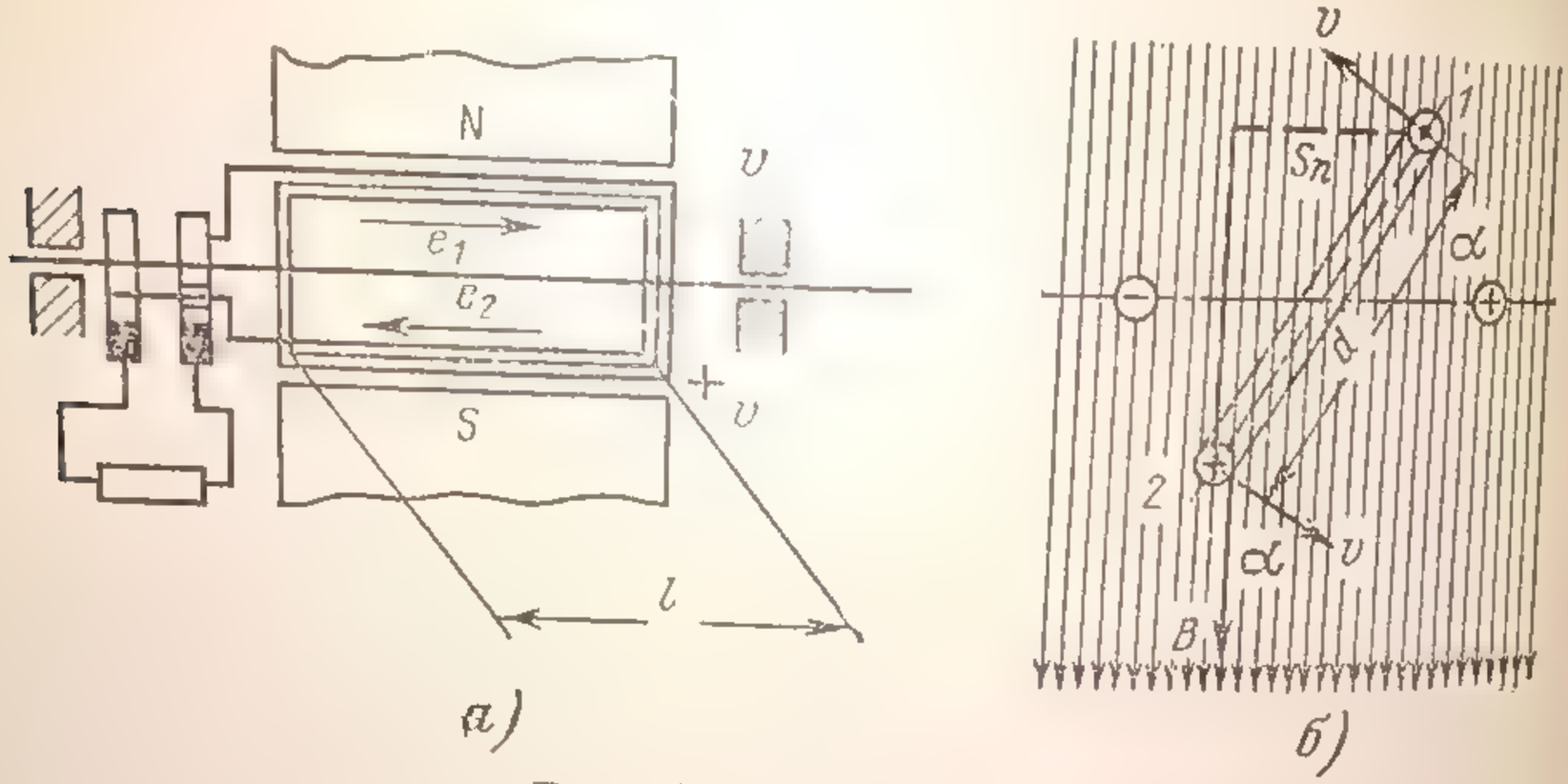


Рис. 5-1. К задаче 5-1.

Рамка в начальный момент времени повернута относительно горизонтального положения на угол ψ, равный 0, -90; $+90°$.

Условие 1. Определить период, частоту, угловую частоту и максимальное значение э. д. с., индуктированной в рамке. Для всех трех случаев начального положения рамки написать аналитические выражения мгновенных значений индуктированной в рамке э. д. с., показать кривые этих э. д. с. и векторы их для начального момента времени $t=0$.

Для всех трех случаев начального положения рамки написать также аналитические выражения мгновенных значений магнитного потока, пронизывающего рамку, исходя из выражения $\Phi=BS_n$, где Φ — мгновенное значение потока, пронизывающего рамку; B — индукция поля и S_n — проекция площади рамки на плоскость, перпендикулярную линиям поля (рис. 5-1, *б*). Показать кривые магнитного потока, пронизывающего рамку, и векторы потоков для начального момента времени $t=0$.

Анализ и решение

Направление э. д. с. в рамке определяется по правилу правой руки. При обходе контура рамки э. д. с., индуктированные в активных сторонах ее, складываются, поэтому общая э. д. с. рамки $e=e_1+e_2=2e_2$, так как $e_1=e_2$. Электродвижущая сила в одной активной стороне рамки (рис. 5-1, *б*) $e_2=Blvw\sin\alpha$. Общая э. д. с. рам-

$_{\text{ан}}\ e=2c_2=2Blv\omega \sin\alpha$. Угол α между направлениями векторов магнитной индукции и скорости $(\overline{B}, \overline{v})$ равен углу поворота рамки α, который при равномерной частоте вращения может быть выражен по формуле $\alpha=\omega t$, где ω — угловая скорость, рад/с; t — время, с. Таким образом, выражение для мгновенной э. д. с., индуктированной в рамке, может быть представлено в виде $e=Blv\omega \sin\omega t$ или $e=E_м \sin\omega t$, где $E_м=2Blv\omega$ — амплитудное или максимальное значение э. д. с. Электродвижущая сила будет изменяться в функции времени по синусоидальному закону.

Магнитный поток, пронизывающий рамку по мере ее вращения, также будет изменяться по синусоидальному закону. Из рис. 5-1, *б* видно, что $S_n=S\cos\alpha=S\cos\omega t$, где S — площадь рамки. Следовательно, поток, пронизывающий рамку, $\Phi=BS_n=BS\cos\alpha=BS\cos\omega t=\Phi_м\cos\omega t$, где $\Phi_м$ — максимальный поток. Заменяя по формуле приведения $\cos\omega t=\sin(\omega t+90°)$, получаем $\Phi=\Phi_м\sin(\omega t+90°)$ *.

Полученные формулы для мгновенных значений э. д. с. и потока относятся к тому случаю, когда в начальный момент времени рамка находилась в горизонтальном положении, угол $\psi=0$. Если же в начальный момент времени рамка окажется повернутой относительно горизонтального положения на угол $\psi\neq0$, то мгновенные выражения для э. д. с. и потока будут:

$$e=E_м\sin(\omega t+\psi) \text{ и } \Phi=\Phi_м\sin(\omega t+\psi+90)^*.$$

Переменный угол под знаком синуса носит название фазы переменной величины, а постоянные углы ψ и $(\psi+90°)$ называются начальными фазами.

Для указанных в задании трех случаев выражения для э. д. с. и магнитного потока соответственно будут:

1) $\psi=0$, $e=E_м\sin\omega t$, $\Phi=\Phi_м\sin(\omega t+90°)$;

2) $\psi=-90°$, $e=E_м\sin(\omega t-90°)$, $\Phi=\Phi_м\sin\omega t$ и

3) $\psi=+90°$, $e=E_м\sin(\omega t+90°)$, $\Phi=\Phi_м\sin(\omega t+180°)$.

Для построения графиков переменных синусоидальных величин пользуются вращающимися векторами. Если вектор по длине равен в масштабе максимальному значению переменной величины, образует в начальный момент времени с осью абсцисс угол, равный начальной фазе, и вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω, то проекции вектора на вертикаль в процессе вращения будут равны в том же масштабе мгновенным значениям переменной величины. Соединив для разных моментов времени (ωt) полученные точки (вершины проекций) плавной кривой, получим кривые — синусоиды переменных величин. Соответствующее построение для заданных трех случаев выполнено на рис. 5-2.

Кривые изменений магнитного потока и э. д. с. представлены для всех трех случаев теми же синусоидами, но с разным положением оси ординат.

---

* В аналитическом выражении мгновенных значений синусоидальных величин фазовые углы должны выражаться не в градусах, а в радианах, так как угловая частота ω имеет размерность рад/с. Однако в тех случаях, когда мгновенные значения переменных величин не требуется вычислять, фазовые углы ради наглядности будут даваться в градусах.

При вычислении мгновенных значений фазовые углы должны быть выражены в радианах.

Угол сдвига фаз между потоком и э. д. с. равен 90° (π/2), причем э. д. с. отстает по фазе от магнитного потока. Это видно из аналитических выражений мгновенных значений (фаза э. д. с. меньше, чем фаза потока), из векторной диаграммы (вектор э. д. с. по ходу вращения против часовой стрелки идет позади вектора потока) и, наконец, из кривых синусоид (кривая э. д. с. сдвинута вправо, т. е. в сторону отставания от кривой магнитного потока).

Один период изменения потока и э. д. с. соответствует одному обороту рамки. Так как рамка вращается с частотой вращения n

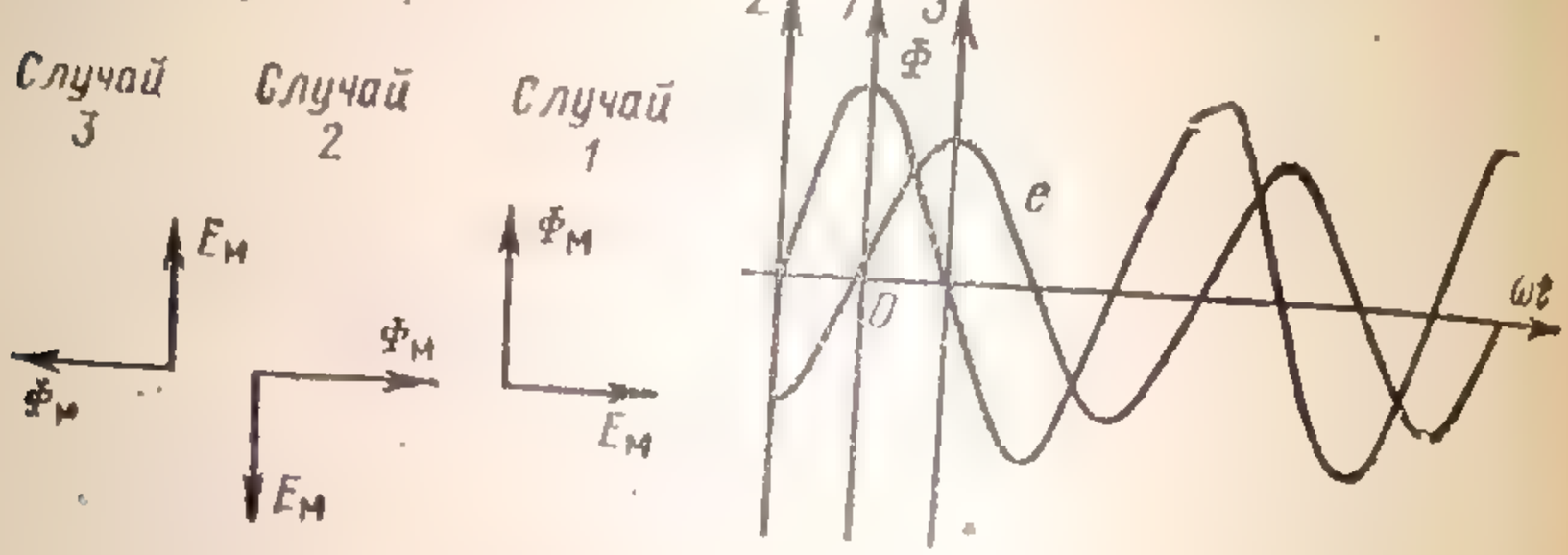


Рис. 5-2. К задаче 5-1.

об/мин, частота э. д. с. будет $f=n/60=3000/60=50$ Гц. Период $T=1/f=1/50=0{,}02$ с. Угловая скорость рамки или в данном случае угловая частота [1] $\omega=\dfrac{2\pi n}{60}=2\pi f=2\pi\cdot 50=100\pi=314$ рад/с.

Линейная скорость рамки $v=\dfrac{\pi dn}{60}=\dfrac{2\pi n}{60}\dfrac{d}{2}=\omega\dfrac{d}{2}$.

Следовательно, $v=314\cdot\dfrac{100}{2}\cdot 10^{-3}=15{,}7$ м/с.

Максимальная э. д. с., индуктированная в рамке, $E_м=2Blv w=2\cdot 0{,}212\cdot 150\cdot 10^{-3}\cdot 15{,}7\cdot 100=1{,}0$ В.

Максимальный магнитный поток $\Phi_м=BS=Bdl=0{,}212\cdot 100\cdot 150\times 10^{-6}=31{,}8\cdot 10^{-4}$ Вб.

Условие 2. Пользуясь аналитическими выражениями мгновенных значений магнитного потока, полученными при решении задачи по условию 1, определить выражения мгновенных э. д. с., исходя из формулы $e=-w\dfrac{d\Phi}{dt}$. Сравнить результаты с выражениями мгновенных значений э. д. с., полученными при решении задачи по условию 1.

Анализ и решение

Электродвижущая сила, индуктированная в рамке переменным магнитным потоком, определится из общего выражения э. д. с. индукции

$$e=-w\frac{d\Phi}{dt}.$$

[1] При данной частоте f угловая скорость зависит от числа полюсов генератора и численно равна угловой частоте только для двухполюсного генератора.

Определив скорость изменения магнитного потока (первая производная от потока по времени) и умножив ее на w, для случая 1 получим:

$$e = -w\Phi_м \omega \cos(\omega t + 90°) = w\Phi_м\omega \sin \omega t,$$

т. е. производная от потока по времени.

Произведение $w\Phi_м\omega$, стоящее перед знаком синуса, выражает амплитудное значение переменной величины. Следовательно, $E_м = w\Phi_м\omega$ и $e = E_м \sin \omega t$.

Для случая 2:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -w\Phi_м\omega \cos \omega t = -E_м \sin(90° - \omega t)$$

или окончательно $e = E_м \sin(\omega t - 90°)$.

Для случая 3:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -w\Phi_м\omega \cos(\omega t + 180°) = E_м \cos \omega t$$

или окончательно $e = E_м \sin(\omega t + 90°)$.

Сравнение с результатами, полученными при решении задачи по условию 1, показывает полное их совпадение.

Из рассмотренных примеров можно сделать очень важный вывод, что во всех случаях, когда катушка пронизывается переменным синусоидальным потоком, в ней индуктируется синусоидальная э. д. с., отстающая от потока по фазе на четверть периода. Начальная фаза в выражении для мгновенных значений не влияет на характер кривых синусоид и на сдвиг фаз между ними; она определяет только начало отсчета или положение оси ординат.

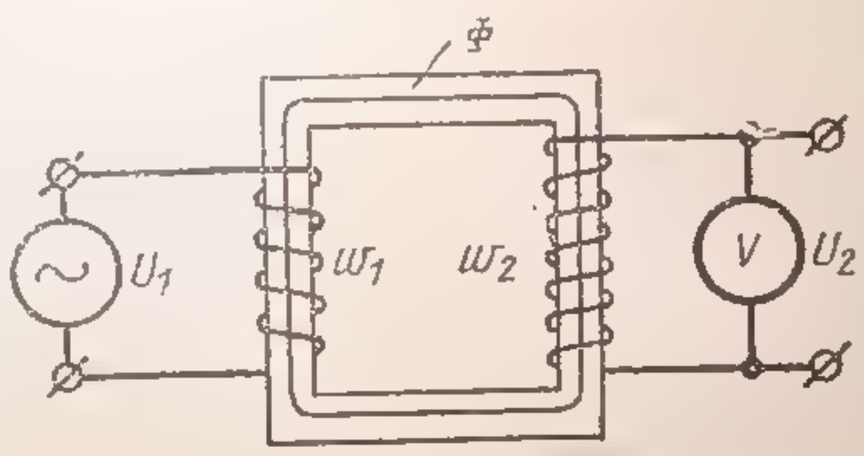


Рис. 5-3. К задаче 5-1.

Можно показать также, что общее выражение для максимальной э. д. с. $E_м = w\Phi_м\omega$ совпадает с частным выражением, полученным в условии 1. Действительно, в условии 1 $E_м = 2Blvw$. Заменяя $v = \omega\frac{d}{2}$ и $ld = S$ (площадь рамки), получаем $E_м = 2Bl\omega\frac{d}{2}w = BS\omega w = w\Phi_м\omega$.

Вопросы и упражнения к задаче 5-1

1. Стальной магнитопровод трансформатора пронизывается переменным синусоидальным магнитным потоком, созданным переменным током в первичной обмотке с числом витков w_1. Число витков вторичной обмотки w_2 (рис. 5-3).

Изменение магнитного потока происходит согласно уравнениям:

а) $\Phi = \Phi_м \sin(\omega t - 90°)$;

б) $\Phi = \Phi_м \sin(\omega t + 60°)$ и

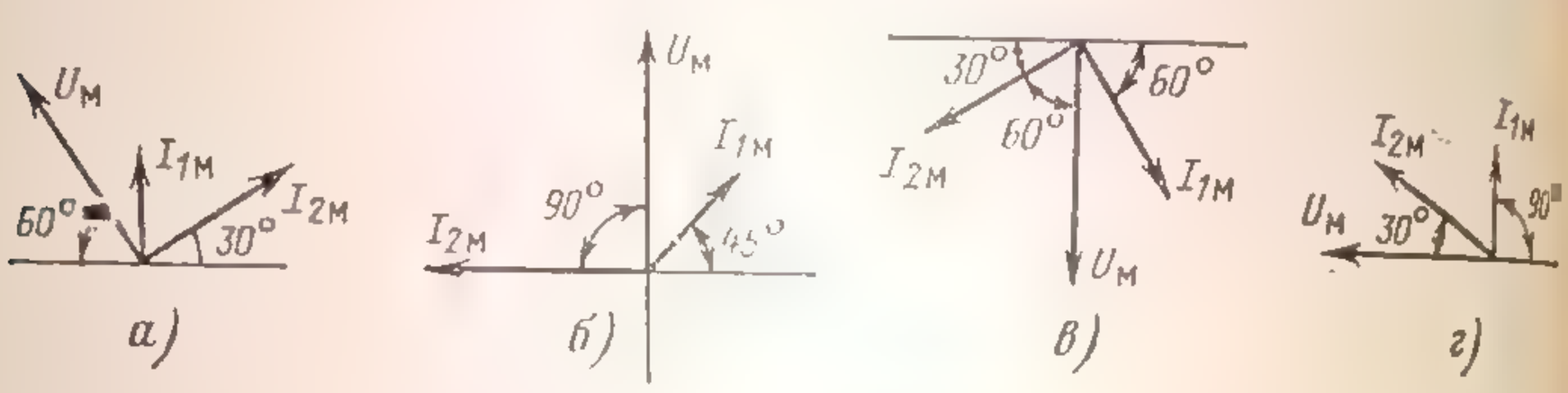
в) $\Phi = \Phi_м \sin(\omega t + 120°)$.

Для всех случаев написать аналитические выражения мгновенных значений э. д. с., индуктированных в обмотках трансформатора,

построить векторную диаграмму и синусоиды потока и э. д. с. и определить сдвиг фаз между ними.

2. Стальной магнитопровод трансформатора пронизывается переменным синусоидальным потоком, созданным переменным током в первичной обмотке с числом витков $w_1 = 1000$; число витков во вторичной обмотке $w_2 = 200$, максимальное значение магнитного потока $\Phi_м = 27 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Определить при частоте 50 Гц максимальные значения э. д. с., индуктированных в первичной и во вторичной обмотках трансформатора.



а) б) в) г)

Рис. 5-4. К задаче 5-1.

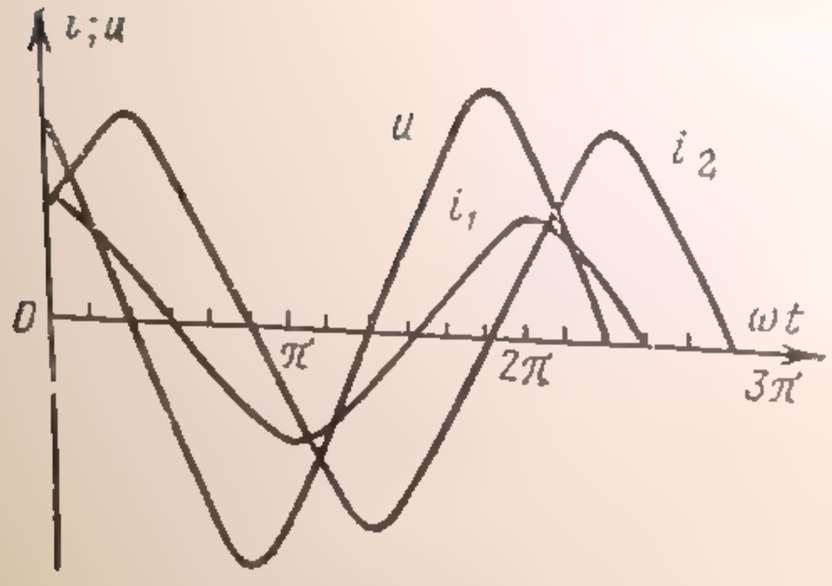


Рис. 5-5. К задаче 5-1.

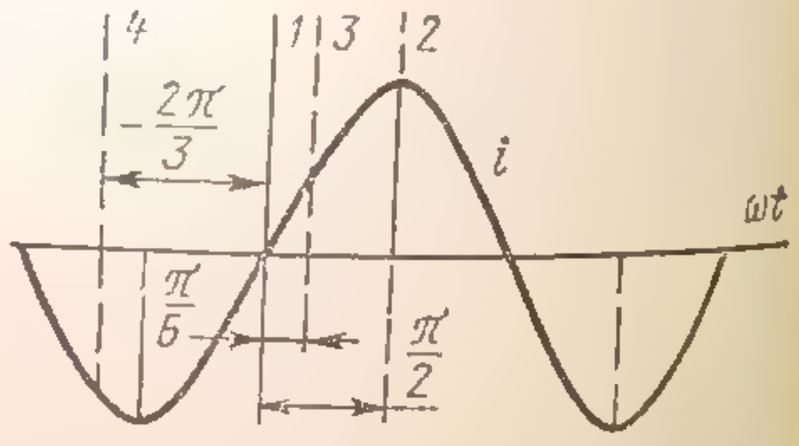


Рис. 5-6. К задаче 5-3.

3. На рис. 5-4, *а—г* даны для момента времени $t = 0$ векторы токов и напряжения, амплитуды которых равны:

$$I_{1м} = 10 \text{ А}; \; I_{2м} = 20 \text{ А}; \; U_м = 169 \text{ В}.$$

Написать аналитические выражения мгновенных значений указанных величин и построить синусоиды этих величин.

Определить сдвиги фаз φ_1 и φ_2 между каждым из токов и напряжением.

4. Для некоторой цепи переменного тока кривые мгновенных значений токов и напряжений представлены на рис. 5-5. Написать аналитические выражения мгновенных значений указанных величин и определить, какая из векторных диаграмм на рис. 5-4, *а—г* соответствует кривым рис. 5-5.

5-2. Для некоторой цепи переменного тока заданы уравнения мгновенных значений токов и напряжений:

$$i_1 = 1{,}5 \sin (\omega t + 90°); \; i_2 = 2{,}5 \sin (\omega t + 30°);$$
$$u = 150 \sin (\omega t + 120°).$$

Начертить в масштабе векторную диаграмму и кривые токов и напряжения. Определить углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между каждым из токов и напряжением и соответствующие им отрезки времени; частота токов и напряжения $f=50$ Гц.

5-3. Синусоидальная кривая тока представлена на рис. 5-6. Написать аналитические выражения для тока при положениях оси ординат, указанных на рис. 5-6 цифрами *1—4*. Для всех четырех случаев изобразить векторы тока для начального момента времени.

Рис. 5-7. К задаче 5-5.

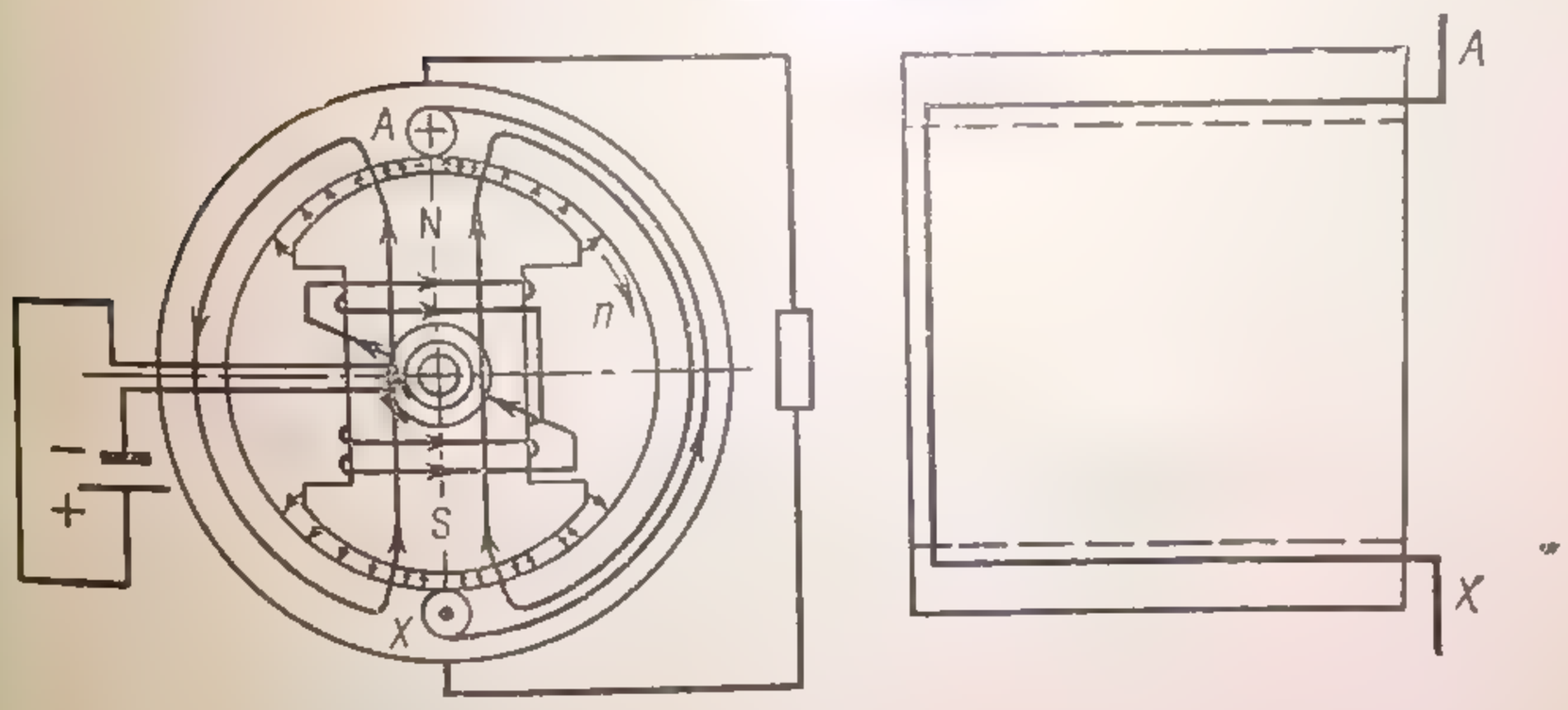


Рис. 5-8. К задаче 5-6.

5-4. Начертить в масштабе векторную диаграмму и кривые тока и напряжения, заданных уравнениями:

$$i_1 = 10 \sin(\omega t + 60°);\ i_2 = 20 \sin(\omega t - 60°);\ u = 120 \sin(\omega t + 30°).$$

5-5. Написать аналитические выражения мгновенных значений переменных синусоидальных величин и построить синусоиды этих величин, векторные диаграммы которых даны на рис. 5-7, *а* и *б*.

5-6. В обмотке статора однофазного генератора (проводники *A*, *X*, рис. 5-8) индуктируется синусоидальная э. д. с. амплитудой $E_м=400$ В. Индукция магнитного поля, созданного током от постороннего источника в обмотке возбуждения ротора, распределяется по окружности статора синусоидально благодаря специальной форме полюсов ротора, при которой воздушный зазор между статором и ротором постепенно уменьшается от края полюса к его середине. При вращающемся роторе это равносильно синусоидальному изменению

магнитной индукции во времени относительно неподвижных проводников статора: $B = B_м \sin \omega t$; $B_м = 0{,}5$ Т. Длина активных проводников обмотки статора 600 мм, число витков обмотки статора — 5. Диаметр ротора 850 мм. Определить частоту вращения ротора (в об/мин), период, частоту и угловую частоту индуктированной э. д. с.

5-7. Гидрогенератор имеет на роторе 80 полюсов и дает переменный ток частотой 50 Гц. Определить частоту вращения ротора этого генератора, выраженную в оборотах в минуту, угловую скорость и угловую частоту переменного тока.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

6-1. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЙ. ПОГРЕШНОСТИ. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

6-1*. Измерительные приборы — амперметр и вольтметр с сопротивлениями $r_а$ и $r_в$ включены в цепь, как показано на рис. 6-1.

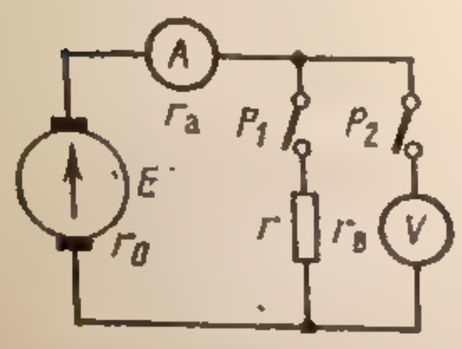


Рис. 6-1. К задаче 6-1.

Условие 1. Считая э. д. с. генератора неизменной, выразить относительную погрешность измерения тока амперметром при отключенном вольтметре (рубильник P_1 замкнут, рубильник P_2 разомкнут).

Анализ и решение

Измеряемое значение тока в цепи должно быть:

$$I' = \frac{E}{r_0 + r}.$$

Но при включении в цепь амперметра сопротивление цепи изменится и действительный ток выразится

$$I = \frac{E}{r_0 + r + r_а}.$$

Абсолютная погрешность измерения тока

$$\Delta I = I' - I = \frac{E r_а}{(r_0 + r + r_а)(r_0 + r)}.$$

Относительная погрешность измерения тока, выраженная в процентах, получится:

$$\gamma_{I\%} = \frac{\Delta I}{I} 100 = \frac{r_а}{r_0 + r} 100.$$

Пренебрегая за малостью внутренним сопротивлением источника, получаем:

$$\gamma_{I\%} = \frac{r_a}{r} 100.$$

Отсюда следует, что чем меньше собственное сопротивление прибора по сравнению с сопротивлением электроприемника, тем меньше относительная погрешность измерения, обусловленная схемой включения амперметра.

При $\frac{r_a}{r} < \frac{1}{100}$ имеем $\gamma_I < 1\%$.

Условие 2. Считая э. д. с. генератора неизменной, выразить относительную погрешность измерения напряжения вольтметром: а) при отключенном электроприемнике (рубильник P_1 разомкнут, P_2 замкнут); б) при включенном электроприемнике (рубильники P_1 и P_2 замкнуты).

Анализ и решение

а) При отключенном электроприемнике напряжение на выводах генератора должно быть равно его э. д. с. Поэтому измеряемое напряжение $U' = E$. Но при включении вольтметра в цепи (рис. 6-1) будет протекать ток вольтметра $I_в$ и, следовательно, действительное напряжение на выводах генератора

$$U = I_в r_в = \frac{E r_в}{r_0 + r_в}.$$

Абсолютная погрешность измерения напряжения теперь выразится:

$$\Delta U = U' - U = \frac{E r_0}{r_0 + r_в}.$$

Относительная погрешность измерения напряжения, выраженная в процентах, получится:

$$\gamma_{U\%} = \frac{\Delta U}{U} 100 = \frac{r_0}{r_в} 100.$$

Из полученной формулы следует, что чем больше сопротивление вольтметра по сравнению с внутренним сопротивлением источника, тем меньше относительная погрешность измерения, обусловленная схемой включения вольтметра.

б) При включенном электроприемнике с сопротивлением можно считать, что вольтметр присоединен к выводам некоторого эквивалентного генератора, имеющего внутреннее сопротивление

$$r_0' = \frac{r_0 (r_a + r)}{r_0 + r_a + r}.$$

И, пренебрегая за малостью сопротивлением амперметра, получаем

$$r_0' = \frac{r_0 r}{r_0 + r}.$$

Тогда относительная погрешность измерения напряжения выразится:

$$\gamma_{U\%} = \frac{r_0'}{r_в} 100 = \frac{r_0 r}{(r_0 + r) r_в} 100.$$

Условие 3. Выразить наибольшую возможность относительную погрешность измерения тока амперметром и напряжения вольтметром с учетом методической погрешности, обусловленной схемой включения прибора, и инструментальной погрешности, обусловленной классом точности прибора.

Анализ и решение

Формулы для определения относительных методических погрешностей $\gamma_{I\%}$ и $\gamma_{U\%}$ выведены в решении задачи по условиям 1 и 2.

Класс точности $\gamma_{кл.точн\%}$ определяет наибольшую допустимую приведенную погрешность прибора, которая устанавливается заводом — изготовителем приборов и указывается на щитке прибора (обычно обводится кружком). В СССР стандартизованы следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Наибольшая относительная погрешность прибора $\gamma_{\%} = \frac{(\Delta A)_{наиб}}{A} 100$; класс точности $\gamma_{кл.точн\%} = \frac{A_{наиб}}{A_н} 100$, где $(\Delta A)_{наиб}$ — наибольшая абсолютная погрешность прибора; A — действительное значение измеряемой величины; $A_н$ — верхний предел измерения прибора. Взяв отношение $\frac{\gamma_{\%}}{\gamma_{кл.точн\%}} = \frac{A_н}{A}$, выразим из него относительную погрешность $\gamma_{\%} = \gamma_{кл.точн} \frac{A_н}{A}$. Из полученного выражения следует, что относительная погрешность прибора приближается к классу точности, если измеряемое значение величины близко к номинальному (верхнему пределу измерения прибора) и, наоборот, если значение измеряемой величины находится близко к началу шкалы, относительная погрешность прибора будет весьма значительной. Общая относительная погрешность сложится из относительной погрешности измерения и относительной погрешности самого прибора.

Вопросы и упражнения к задаче 6-1

1. Определить относительную погрешность измерения тока амперметром по условию 1 для двух случаев: а) $r_а = 0{,}01$ Ом, $r = 10$ Ом и б) $r_а = 0{,}01$ Ом, $r = 0{,}1$ Ом.

2. Определить относительную погрешность измерения напряжения вольтметром по условию 2«а», если $r_0 = 0{,}5$ Ом, $r_в = 2000$ Ом.

3. Определить относительную погрешность измерения напряжения вольтметром по условию 2«б», если $r_0 = 0{,}5$ Ом, $r = 10$ Ом, $r_в = 2000$ Ом.

4. Определить относительную погрешность амперметра с пределом измерения 5 А при измерении тока 0,5 и 4 А. Амперметр имеет класс точности 1,5.

5. Определить относительную погрешность вольтметра с пределом измерения 150 В при измерении напряжения 10 и 120 В. Вольтметр имеет класс точности 2,5.

6. Определить общую относительную погрешность измерения тока амперметром класса точности 1 с пределом измерения тока 2,5 А при измерении тока 0,5 и 2 А. Сопротивление амперметра 0,02 Ом и сопротивление нагрузочного реостата 4 Ом.

7. Определить общую относительную погрешность измерения напряжения на выводах источника э. д. с. вольтметром класса точности 0,5 с пределом измерения 15 В при измерении напряжений 3 и 10 В. Сопротивление вольтметра 500 Ом, внутреннее сопротивление источника 2 Ом.

8. В каких из приведенных случаев относительная погрешность измерения тока в процентах составит 0,01; 0,25; 0,3; 0,5; а) $r_а$ = =0,01 Ом, r=4 Ом; б) $r_а$=0,015 Ом, r=5 Ом; в) $r_а$=10 Ом, r= =2 кОм; г) $r_а$=100 Ом; r=1 МОм.

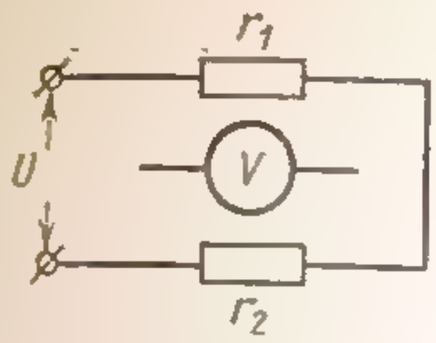


Рис. 6-2. К задаче 6-3.

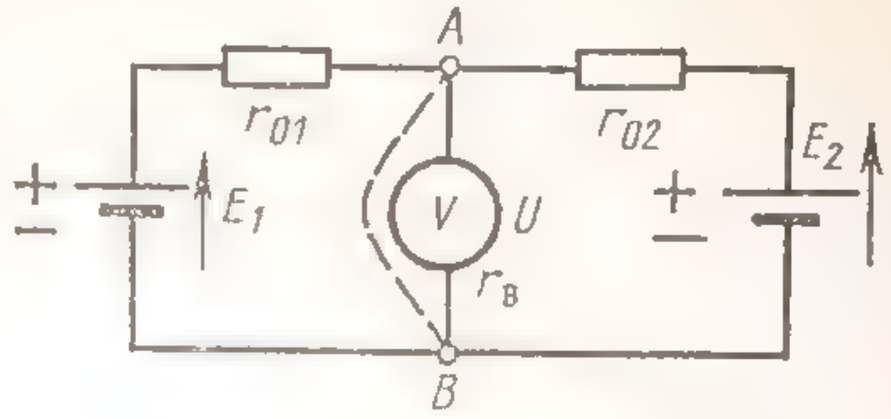


Рис. 6-3. К задаче 6-4.

6-2. Амперметр с сопротивлением 0,04 Ом и вольтметр с сопротивлением 1800 Ом включены в цепь, как указано на рис. 6-1. Электродвижущая сила источника 120 В, внутреннее сопротивление его 0,1 Ом, внешнее сопротивление нагрузки r=11,9 Ом.

Условие 1. Определить показания приборов и мощности, потребляемые ими.

Условие 2. Определить погрешность измерения тока амперметром, обусловленную схемой включения прибора при отключенном вольтметре, и общую относительную погрешность, если амперметр класса точности 2,5 имеет предел измерения 15 А.

Условие 3. Определить погрешность измерения напряжения вольтметром, обусловленную схемой включения прибора; а) при отключенном внешнем сопротивлении, б) при включенном внешнем сопротивлении.

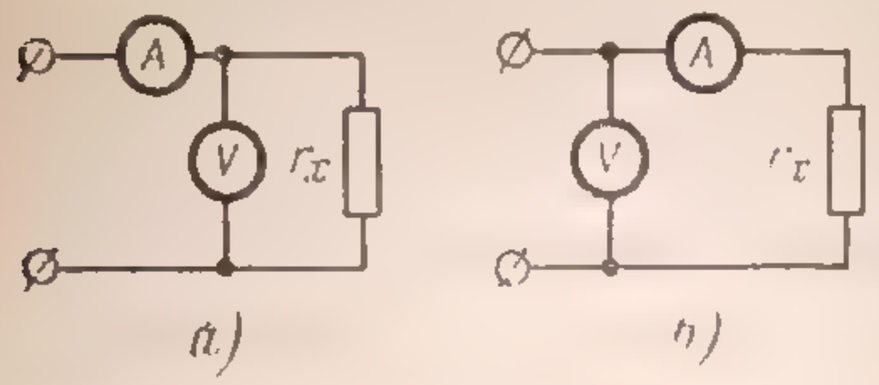
Определить также для обоих случаев общую относительную погрешность, если вольтметр класса точности 1,5 имеет предел измерения 150 В.

Условие 4. Определить показание амперметра и вольтметра, если вольтметр ошибочно включить в цепь последовательно.

6-3. В цепи рис. 6-2 r_1=50 Ом, r_2=190 Ом. Напряжение сети постоянно и равно 120 В. Для измерения напряжений на участках резисторов r_1 и r_2 вольтметр поочередно присоединяется к выводам этих резисторов. Включение вольтметра, имеющего собственное сопротивление $r_в$, вызывает изменение тока в цепи и напряжений на участках Определить напряжения на участках U_1 и U_2 при отсутствии вольтметра, показания вольтметра на каждом из участков $U_{в1}$ и $U_{в2}$, а также относительные погрешности измерений γ_1 и γ_2, обусловленные включением вольтметра. Сопротивление вольтметра $r_в$ принять равным 500, 1000, 4000 Ом.

6-4. Для цепи рис. 6-3 определить показание вольтметра по следующим данным: $E_1=50$ В; $E_2=54$ В; $r_{01}=0{,}4$ Ом; $r_{02}=1$ Ом. Сопротивление вольтметра принять равным $r_{v1}=\infty$.

6-5*. Для измерения сопротивления по методу амперметра и вольтметра можно воспользоваться схемой рис. 6-4, *а* или *б*. Определить общие относительные погрешности измерения сопротивления по схемам рис. 6-4, *а* и *б* по следующим данным: амперметр класса точности 1,5 с пределом измерения 5 А имеет сопротивление 0,1 Ом, вольтметр класса точности 1 с пределом измерения 50 В имеет сопротивление 4000 Ом. При измерении сопротивления показания приборов оказались: амперметра 1 А, вольтметра 40 В.



а) *б)*

Рис. 6-4. К задаче 6-5.

Анализ и решение

При пользовании для измерения сопротивления схемой рис. 6-4, *а* амперметр покажет ток, проходящий через искомое сопротивление r_x, а вольтметр будет учитывать кроме напряжения на этом сопротивлении напряжение, приходящееся на амперметр. Поэтому истинное значение сопротивления r_x определится по формуле:

$$r_x = \frac{U-U_a}{I} = \frac{U-Ir_a}{I} = \frac{U}{I} - r_a,$$

где U_a — напряжение, приходящееся на амперметр, а r_a — сопротивление амперметра.

Если сопротивление амперметра r_a мало по сравнению с измеряемым сопротивлением r_x, последнее можно определить по приближенной формуле:

$$r_x' = \frac{U}{I} = \frac{40}{1} = 40 \text{ Ом}.$$

При пользовании приближенной формулой сопротивление r_x' получит значение больше истинного. Относительная погрешность измерения будет зависеть от того, во сколько раз сопротивление амперметра r_a меньше искомого.

Действительно, относительная погрешность, обусловленная схемой включения приборов, выразится:

$$\gamma_{\text{мет}\%} = \frac{r_x'-r_x}{r_x}100 = \frac{\frac{U}{I} - \left(\frac{U}{I} - r_a\right)}{r_x}100 = \frac{r_a}{r_x}100.$$

Подставляя числовые данные и считая, что истинное значение сопротивления r_x мало отличается от вычисленного r_x', получаем

$$\gamma_{\text{сх.а}} = \frac{0{,}1}{40}100 = 0{,}25\%.$$

Общая погрешность измерения кроме обусловленной схемой включения прибора содержит еще погрешность, обусловленную классом точности измерительных приборов. Эти погрешности могут быть определены по формулам (см. решение задачи 6-1, условие 3):

$$\gamma_a = \gamma_{кл.точн.а} \frac{I_н}{I} = 1{,}5 \frac{5}{1} = 7{,}5\%$$

и

$$\gamma_в = \gamma_{кл.точн.в} \frac{U_н}{U} = 1 \quad \frac{50}{40} = 1{,}25\%.$$

Общая наибольшая относительная погрешность

$$\gamma_{общ\%} = \gamma_{сх\%} + \gamma_{а\%} + \gamma_{в\%} = 0{,}25 + 7{,}5 + 1{,}25 = 9\%.$$

При пользовании схемой рис. 6-4, *б* вольтметр покажет действительное напряжение на выводах искомого сопротивления, а амперметр кроме тока, проходящего через искомое сопротивление, будет еще учитывать ток $I_в$, ответвляющийся через вольтметр.

Поэтому

$$r_x = \frac{U}{I - I_в} \quad \frac{I}{I - \frac{U}{r_в}},$$

где r_x — сопротивление вольтметра.

Если искомое r_x значительно меньше $r_в$, можно пренебречь током, ответвляющимся через вольтметр, и сопротивление определить по приближенной формуле $r'_x = U/I$.

При пользовании приближенной формулой сопротивление r'_x получит значение меньше истинного. Относительная погрешность измерения будет зависеть от отношения $r'_x/r_в$. Действительно,

$$\gamma_{сх\%} = \frac{r'_x - r_x}{r_x} 100.$$

С другой стороны,

$$r_x = \frac{U}{1 - \frac{U}{r_в}}.$$

Разделив числитель и знаменатель на ток I, получим:

$$r_x = \frac{r'_x}{1 - \frac{r'_x}{r_в}} = \frac{r'_x r_в}{r_в - r'_x}.$$

Отсюда

$$\frac{r'_x}{r_x} = \frac{r_в - r'_x}{r_в}.$$

Пользуясь производной пропорцией, получаем:

$$\gamma_{сх\%} = \frac{r_x' - r_x}{r_x} 100 = -\frac{r_x'}{r_в} 100.$$

Подставляя числовые данные, получаем: $\gamma_{сх\%} = -\frac{40}{4000} 100 = -1\%$, т. е. больше, чем в первом случае.

Знак минус указывает на то, что погрешность измерения отрицательна, т. е. полученное в результате измерения значение r_x' будет меньше истинного r_x.

Общая наибольшая относительная погрешность измерения, как в первом случае, выразится $\gamma_{общ\%} = -(\gamma_{сх\%} + \gamma_{а\%} + \gamma_{в\%}) = -(1+7{,}5+1{,}25) = -9{,}75\%$*.

6-6*. Стрелка омметра, принципиальная схема которого представлена на рис. 6-5, при измерении сопротивления установилась против деления 40 Ом, что охватывает примерно 0,4 длины рабочей части шкалы l. Определить относительную погрешность измерения сопротивления. Класс точности омметра 1,5.

Анализ и решение

Приборы для непосредственного измерения сопротивления называются омметрами или мегаомметрами. Омметр (рис. 6-5) имеет измерительный механизм с двумя подвижными катушками, укрепленными на одной оси, и стрелкой. Токи в катушках, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создают два электромагнитных вращающих момента, направленных в разные стороны. Под влиянием разности этих моментов подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока моменты не уравновесятся. При этом угол поворота подвижной части прибора будет определяться отношением токов в катушках (принцип логометра), т. е. отношением сопротивлений $\frac{r_x + r_2}{r_{доб} + r_1}$, так как токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей. Таким образом, угол поворота стрелки будет зависеть от измеряемого сопротивления r_x, что позволяет производить отсчет по шкале прибора непосредственно в омах.

Для омметра относительная погрешность определяется классом точности прибора и длиной шкалы, по которой производится отсчет, т. е. для условия данной задачи

$$\gamma_{\Omega\%} = 1{,}5 \frac{l}{0{,}4\,l} = 3{,}75\%.$$

Вопросы и упражнения к задачам 6-5, 6-6

1. Выразить отношение погрешностей, обусловленных схемами рис. 6-4, *а* и *б*, и из него установить, при каком соотношении сопротивлений r_x, $r_а$ и $r_в$ получается меньшая погрешность: при пользовании схемой *а* или при пользовании схемой *б*.

* Погрешности приборов могут иметь знаки «±». Наибольшая возможная относительная погрешность получится, если все погрешности взять со знаком минус.

2. Для схемы омметра, изображенной на рис. 6-5, определить, в какую сторону и до какого деления отклонится стрелка прибора, если: а) сопротивление r_x отключить; б) сопротивление зашунтировать накоротко; в) источник питания отключить?

6-7. При измерении некоторого сопротивления по методу амперметра и вольтметра амперметр класса точности 1,5 с пределом измерения 3 А и с сопротивлением 0,2 Ом показал 1 А, вольтметр класса точности 0,5 с пределом измерения 150 В и с сопротивлением 4000 Ом показал 100 В. Определить общие наибольшие относительные погрешности измерения для схем рис. 6-4, *а* и *б*.

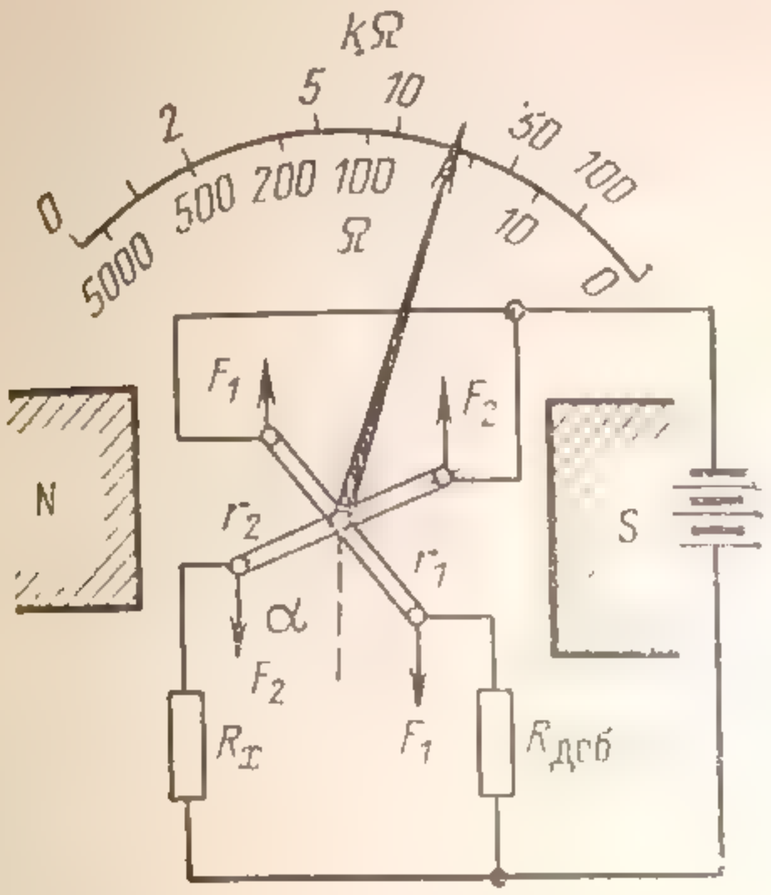


Рис. 6-5. К задачам 6-6, 6-8.

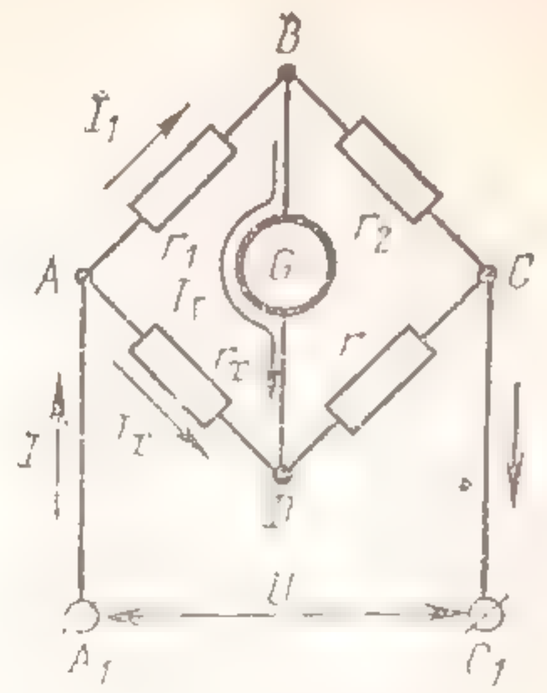


Рис. 6-6. К задаче 6-9.

6-8. Определить относительную погрешность измерения сопротивлений омметром класса точности 1,5, если стрелка прибора устанавливается против делений 2, 5, 10, 20, 50 и 100 кОм. Омметр включен по схеме рис. 6-5 При расчете длину дуги по шкале прибора заменить длиной хорды, считая от нулевой отметки шкалы.

6-9. В схеме измерительного моста, служащего для измерения сопротивлений (рис. 6-6), сопротивления реостатов r_1, r_2 и r подобраны так, что ток в ветви с гальванометром отсутствует. Определить сопротивление r_x, если $r_1=4$ Ом, $r_2=2$ Ом, $r=10$ Ом.

Указание. Сопротивление r_x определяется из условия равновесия моста.

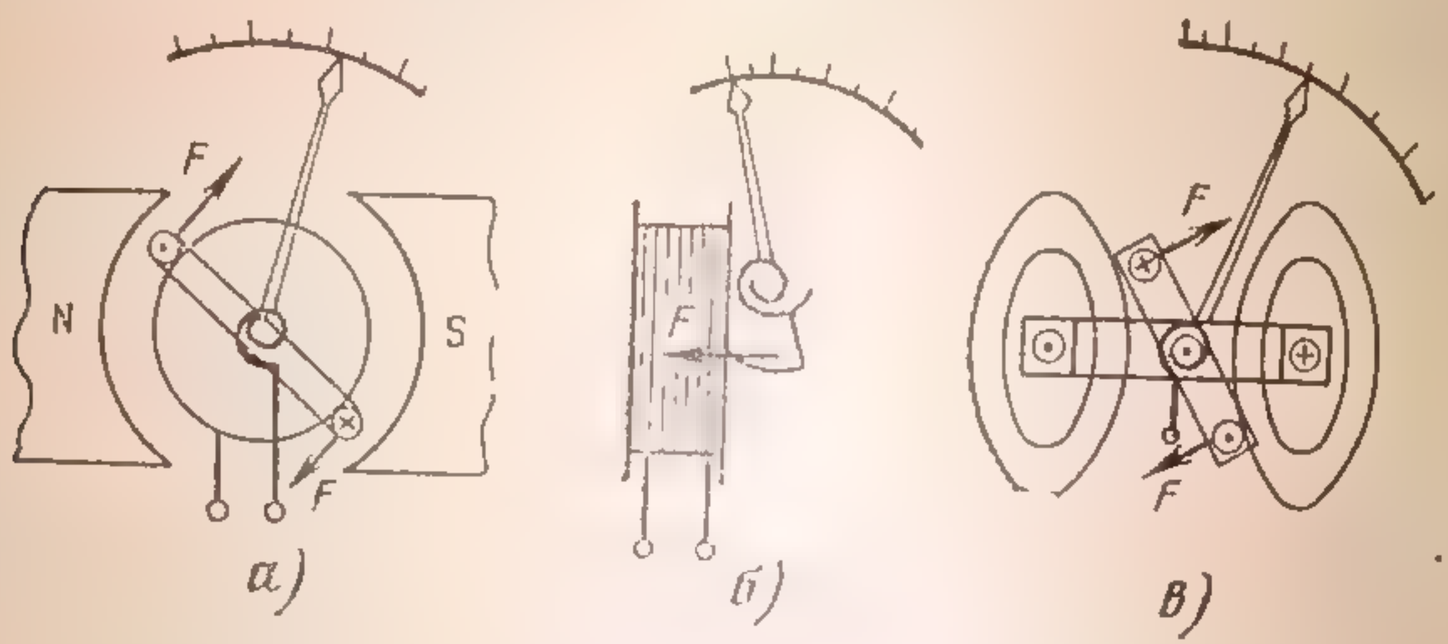
6-2. СИСТЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ РАЗНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ, СОПРОТИВЛЕНИЯ, МОЩНОСТИ, УГЛА СДВИГА ФАЗ, РАСХОДА ЭНЕРГИИ. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

6-10*. Измерительные приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем (рис. 6-7, *а—в*) используются для измерения токов и напряжений. Шкалы приборов магнитоэлектрической системы равномерные, электромагнитной и электродинамической систем квадратичные. Шкалы всех приборов имеют

по 15 делений и отградуированы по постоянному току и напряжению; у амперметров от нуля до 3 А, у вольтметров от нуля до 150 В. Определить цену деления и показания амперметров и вольтметров указанных систем в цепи постоянного тока с напряжением 120 В и током 2 А и в цепи синусоидального переменного тока с такими же максимальными напряжением и током.

Анализ и решение

Цена деления у амперметров 3/15=0,2 А/дел, у вольтметров 150/15=10 В/дел. Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии тока, протекающего по обмотке прибора, с магнитным полем постоянного магнита (рис. 6-7, *а*). Электромагнитный вращающий момент, действующий на подвижную обмотку



а) *б)* *в)*

Рис. 6-7. К задаче 6-10.

прибора, пропорционален току: $M_{вр}=kI$. В цепи переменного тока на обмотку прибора действует мгновенный момент, пропорциональный мгновенному значению переменного тока, $m_{вр}=ki$. Поворот подвижной части происходит под действием среднего момента за период $M_{ср}=k(i)_{ср}$ на угол, при котором противодействующий момент, создаваемый закручивающейся спиральной пружиной, уравновесит вращающий момент. Для вольтметров, учитывая, что $I=U/r$, где r — сопротивление прибора, $M_{вр}=k\dfrac{U}{r}=k_1U$, а в цепи переменного тока $m_{вр}=k_1u$ и средний момент $M_{ср}=k_1(u)_{ср}$. Поэтому показание амперметра в цепи постоянного тока $I=2$ А, что соответствует 2/0,2=10 делениям шкалы, показание вольтметра $U=120$ В, что соответствует 120/10=12 делениям шкалы.

В цепи переменного тока приборы магнитоэлектрической системы покажут нуль, так как средние значения переменных тока и напряжения за период равны нулю. Следовательно, приборы магнитоэлектрической системы непригодны для непосредственных измерений в цепи переменного тока.

Работа приборов электромагнитной системы основана на втягивании ферромагнитной пластинки в обмотку, по которой проходит ток (рис. 6-7, *б*). Работа приборов электродинамической системы основана на взаимодействии токов, протекающих по подвижной и неподвижной обмоткам (рис. 6-7, *в*). По условиям задачи приборы этих систем имеют квадратичную шкалу. Это говорит о том, что вра-

щий момент у них пропорционален квадрату тока: $M_{вр}=kI^2$, а в цепи переменного тока мгновенный момент $m_{вр}=ki^2$, и средний момент, под действием которого происходит поворот подвижной системы, $M_{ср}=k(i^2)_{ср}$.

В цепи постоянного тока приборы этих систем покажут: амперметры 2 А, что соответствует 10 делениям шкалы, вольтметры 120 В, что соответствует 10 делениям шкалы, т. е. показания будут такими же, как у приборов магнитоэлектрической системы.

В цепи переменного тока под действием среднего момента подвижная часть амперметров отклонится на угол, соответствующий некоторому эквивалентному постоянному току, для которого вращающий момент будет равен среднему моменту, созданному переменным током, т. е. $M_{вр}=M_{ср}$ или $kI^2=k(i^2)_{ср}$.

Отсюда значение постоянного тока, эквивалентного по своему действию (в данном случае на подвижную часть прибора) данному переменному току, называемое *действующим значением переменного тока*, будет $I=\sqrt{(i^2)_{ср}}$. Аналогично действующее значение напряжения $U=\sqrt{(u^2)_{ср}}$.

На рис. 6-8 показаны кривые переменного тока и квадрата тока. Кривая квадрата тока — это тоже синусоида, но со смещенной осью абсцисс. Амплитуда этой кривой равна в соответствующем масштабе $I_м^2$, а среднее значение, как видно из графика, $(i^2)_{ср}=I_м^2/2$. Следовательно, действующее значение переменного тока $I=\sqrt{(i^2)_{ср}}=\sqrt{I_м^2/2}=I_м/\sqrt{2}$ и аналогично действующее значение переменного напряжения $U=U_м/\sqrt{2}$.

Из изложенного следует, что приборы электромагнитной и электродинамической систем и вообще всех систем, у которых вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален квадрату тока, в цепи переменного тока будут показывать действующие значения тока и напряжения.

Применительно к условию данной задачи показания амперметров будут $I=I_м/\sqrt{2}=0{,}707\,I_м=0{,}707\cdot 2=1{,}41$ А, что соответствует примерно 7 делениям шкалы, а показания вольтметров $U=U_м/\sqrt{2}\approx 120/\sqrt{2}=85$ В, что соответствует примерно 8,5 делениям шкалы.

6-11*. Обмотка измерительного прибора магнитоэлектрической системы имеет сопротивление $r_п=20$ Ом и рассчитана на предельный длительный ток 10 мА, при котором подвижная часть прибора получает наибольшее отклонение.

Условие 1. Прибор желают использовать в качестве амперметра с пределом измерения тока 5 А. Определить сопротивление шунта, который нужно присоединить к выводам прибора, и сопротивление полученного таким образом амперметра (рис. 6-9).

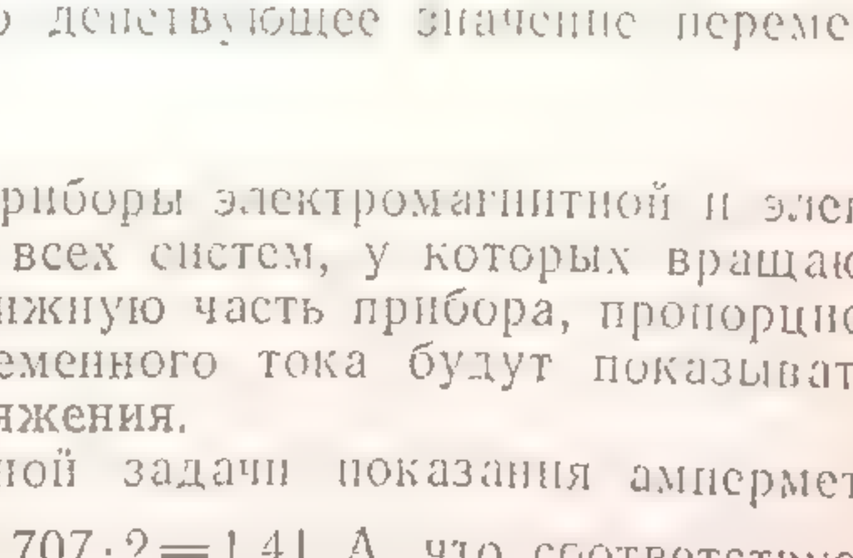


Рис. 6-8. К задаче 6-10.

Анализ и решение

Ток в неразветвленной части цепи (измеряемый ток) равен сум. ме токов измерительной обмотки и шунта: $I = I_и + I_ш$.

Коэффициент шунтирования $p_ш$ показывает, во сколько раз из. меряемый ток больше, чем ток в измерительной обмотке, т. е.

$$p_ш = \frac{I}{I_и} = \frac{I_и + I_ш}{I_и} = 1 + \frac{I_ш}{I_и}.$$

Но токи в параллельных ветвях — шунте и измерительной обмот. ке обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей, поэтому

$$p_ш = 1 + \frac{I_ш}{I_и} = 1 + \frac{r_и}{r_ш},$$

откуда

$$r_ш = \frac{r_и}{p_ш - 1}.$$

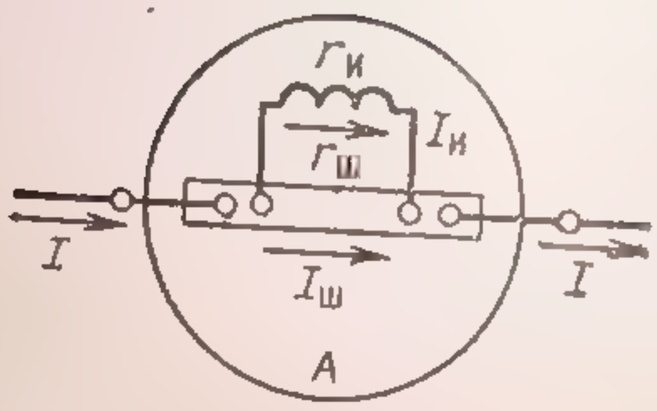


Рис. 6-9. К задаче 6-11.

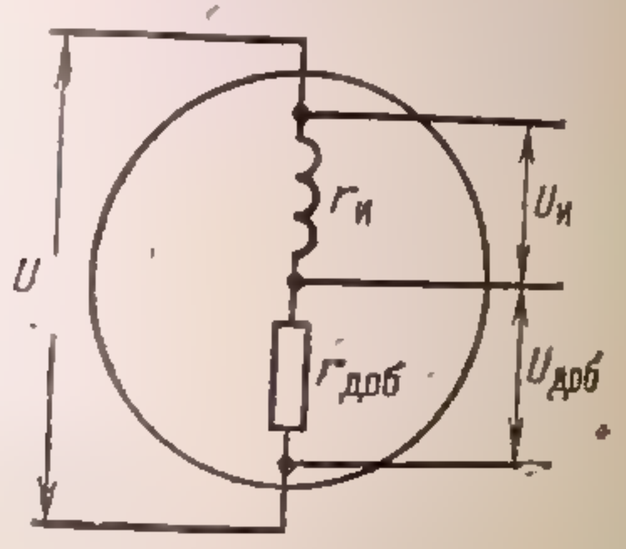


Рис. 6-10. К задаче 6-11.

В условиях данной задачи

$$p_ш = \frac{I}{I_и} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ и } r_ш = \frac{20}{499} = 0{,}04 \text{ Ом}.$$

Теперь сопротивление амперметра (эквивалентное сопротивле ние двух параллельных ветвей) выразится:

$$r_а = \frac{r_ш r_и}{r_ш + r_и} = \frac{0{,}04 \cdot 20}{20{,}04} = 0{,}04 \text{ Ом}.$$

Условие 2. Прибор желают использовать в качестве вольтметра с пределом измерения напряжения 100 В. Определить сопротивление добавочного резистора, который нужно последовательно соединить с прибором, и сопротивление полученного таким образом вольтметра (рис. 6-10).

Анализ и решение

Измеряемое напряжение равно сумме напряжений, приходящихся на катушку прибора и на добавочный резистор: $U = U_и + U_{доб}$.

Коэффициент добавочного сопротивления показывает, во сколько раз измеряемое напряжение больше, чем напряжение на выводах измерительной обмотки, т. е.

$$p_д = \frac{U}{U_и} = \frac{U_и + U_{доб}}{U_и} = 1 + \frac{U_{доб}}{U_и}.$$

Напряжения на последовательно соединенных участках (катушка и добавочный резистор) распределяются пропорционально сопротивлениям этих участков, поэтому

$$p_д = 1 + \frac{U_{доб}}{U_и} = 1 + \frac{r_{доб}}{r_и},$$

откуда

$$r_{доб} = r_и (p_д - 1).$$

В условиях данной задачи $U = 100$ В, $U_и = I_и r_и = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 0{,}2$ В.

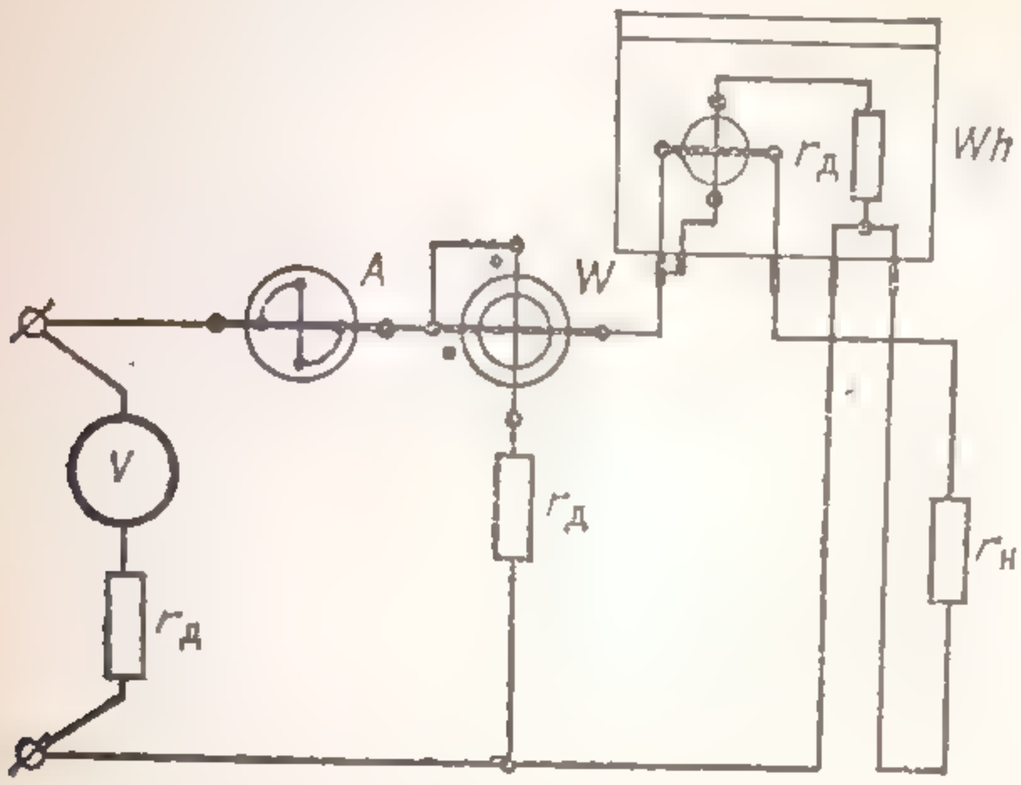


Рис. 6-11. К задаче 6-12.

Коэффициент добавочного сопротивления

$$p_д = \frac{U}{U_и} = \frac{100}{0{,}2} = 500.$$

Следовательно, $r_{доб} = r_и (p_д - 1) = 20(500 - 1) = 9980$ Ом.

Отсюда сопротивление вольтметра получится $r_в = r_и + r_{доб} = 20 + 9980 = 10\,000$ Ом.

6-12*. В цепь переменного тока включены измерительные приборы: амперметр, вольтметр, ваттметр электродинамической системы и счетчик индукционной системы (рис. 6-11). Катушки приборов с малым сопротивлением, $r_1 = 0{,}1$ Ом, выполнены из провода большого сечения и обозначены на схеме жирными линиями, катушки с большим сопротивлением, $r_2 = 4$ Ом, выполнены из провода меньшего сечения и обозначены на схеме тонкими линиями. Мгновенные значения тока и напряжения в цепи определяются уравнениями:

$$i = \left[2{,}82 \sin\left(\omega t + \frac{5}{18}\pi\right)\right], \text{ А}; \quad u = \left[169 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\right], \text{ В}.$$

Определить:

1) показания амперметра и вольтметра;

2) сопротивление добавочного резистора в приборах $r_д$ (рис. 6-11), если падение напряжения в обмотках с большим сопротивлением не должно превышать 120 мВ;

3) показание ваттметра;

4) расход энергии за 8 ч работы и число оборотов диска счетчика, если при расходе энергии в 1 кВт·ч диск совершает 4000 оборотов.

Анализ и решение

1. Измерительные приборы — амперметр и вольтметр покажут действующие значения тока и напряжения:

$$I = I_м/\sqrt{2} = 2{,}82/\sqrt{2} = 2\text{ А},\quad U = U_м/\sqrt{2} = 169/\sqrt{2} = 120\text{ В}.$$

2. Коэффициент добавочного сопротивления

$$p_д = \frac{U}{U_2} = \frac{120}{0{,}120} = 1000,$$

отсюда сопротивление добавочного резистора $r_д = r_2(p_д - 1) = 4 \cdot 999 = 3996$ Ом.

3. В ваттметрах и счетчиках одна обмотка с малым сопротивлением включается в цепь последовательно, другая с добавочным резистором — параллельно. Для правильного присоединения выводы ваттметра, соединяемые между собой, обозначены на схеме рис. 6-11 точками (генераторные выводы).

Мгновенный вращающий момент, действующий на подвижную часть ваттметра, пропорционален произведению токов $i_1 i_2$ или мгновенной мощности p. Действительно, $m_{вр} = k i_1 i_2$, заменяя ток в параллельной обмотке ваттметра по формуле закона Ома $i_2 = \frac{u}{r_2 + r_д}$ и учитывая, что ток в последовательной обмотке I равен нагрузочному току i, получаем

$$m_{вр} = ki\frac{u}{r_2 + r_д} = k'p,$$

где

$$k' = \frac{k}{r_2 + r_д} \text{ и } p = iu.$$

Поворот подвижной части прибора произойдет под действием среднего момента на угол, пропорциональный средней мощности, $M_{ср} \sim P_{ср}$. Следовательно, ваттметр в цепи переменного тока покажет среднюю мощность, при этом шкала прибора в отличие от амперметров и вольтметров той же системы будет равномерной.

Средняя мощность в цепи переменного тока, как это будет доказано в задачах гл. 7, определяется выражением $P = UI\cos\varphi$, где φ — угол сдвига фаз между током и напряжением. Из условия задачи следует, что

$$\varphi = \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \left(\omega t + \frac{5}{18}\pi\right) = \frac{2}{9}\pi \text{ или } \varphi = 40°.$$

Следовательно, показание ваттметра $P = 120 \cdot 2 \cdot \cos 40° = 240 \times 0{,}766 = 184$ Вт.

4. Работа счетчика индукционной системы основана на взаимодействии вихревых токов, индуктированных в алюминиевом диске,

с переменным магнитным полем электромагнитов, индуктирующих эти токи (рис. 6-12).

Вращающий момент, действующий на диск, пропорционален средней мощности переменного тока $M_{вр}=k_1P$, а тормозной момент, создаваемый полем постоянного магнита, индуктирующим в диске вихревые токи, пропорционален частоте вращения диска $M_т=k_2n$. Диск будет вращаться с постоянной частотой n (об/мин) при $M_{пр}=M_т$ или $k_1P=k_2n$. Умножая обе части равенства на время t, получаем $k_1Pt=k_2nt$ или $k_1W=k_2N$. Отсюда расход энергии $W=\frac{k_2}{k_1}N=kN$ пропорционален числу оборотов N, сделанных диском

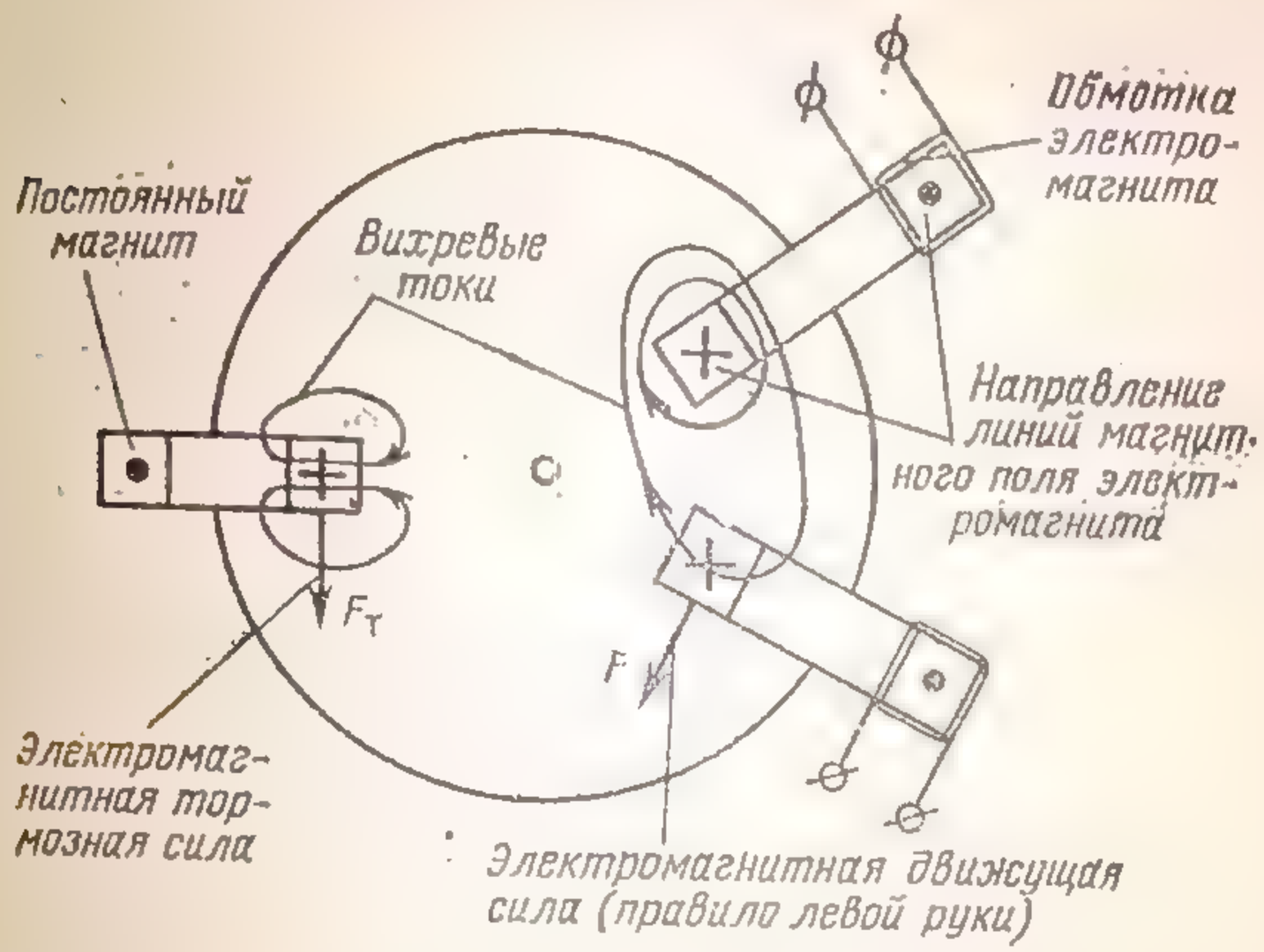


Рис. 6-12. К задаче 6-12.

за время t; $k=W/N$ — постоянная счетчика. По данным задачи $k=\frac{100}{400}=0{,}25$ Вт·ч/об. Расход энергии $W=Pt=181\cdot8=1470$ Вт·ч. Число оборотов диска

$$N=\frac{W}{k}=\frac{470}{0{,}25}=5900.$$

6-13. Определить показание амперметра в цепи, если закон изменения тока имеет выражение $i=I_м\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{3}\right)$, а значение тока для момента времени $t=0$ будет $i_{t=0}=0{,}433$ А.

6-14. Определить показание вольтметра в цепи, если напряжение изменяется по закону $u=U_м\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{10}\right)$, значение напряжения для момента времени $t=0{,}01$ с, $u_{t=0{,}01}=37{,}1$ В, а частота $f=50$ Гц.

6-15. К амперметру магнитоэлектрической системы с пределом измерения 5 А требуется подобрать наружный шунт, чтобы расширить предел измерения до 50 А. Определить сопротивление шунта

и падение напряжения в нем, если сопротивление амперметра 0,015 Ом.

6-16. Переключатель, вмонтированный в амперметр (рис. 6-13), позволяет использовать прибор на два предела измерения тока: 2,5 и 5 А. Определить коэффициенты шунтирования и сопротивления шунтов $r_{ш1}$ и $r_{ш2}$ для обоих пределов измерения тока, если сопротивление измерительной обмотки прибора 15 Ом и падение напряжения в ней не должно превышать 75 мВ.

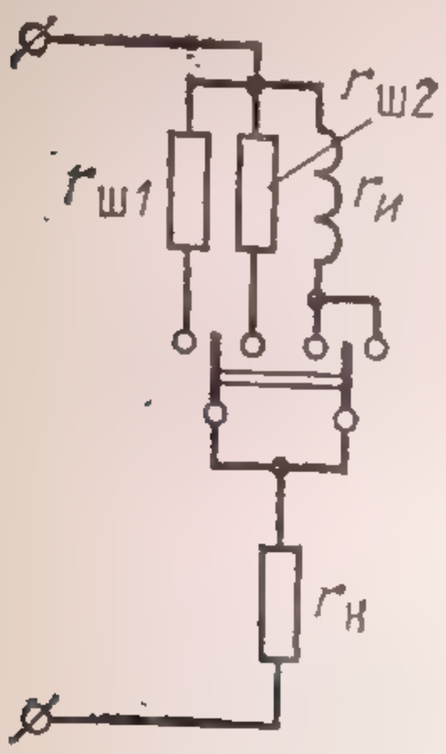


Рис. 6-13. К задаче 6-16.

6-17. Многопредельный вольтметр имеет пределы измерения напряжения 3, 15, 150 и 300 В. Определить для указанных пределов сопротивления добавочных резисторов $r_{д1}$, $r_{д2}$, $r_{д3}$ и $r_{д4}$ (рис. 6-14), если измерительная обмотка прибора имеет сопротивление $r_и = 10$ Ом и падение напряжения в ней не должно превышать 15 мВ. Определить также для всех пределов измерения сопротивления вольтметра.

6-18. Определить цену деления многопредельных измерительных приборов:

1) амперметра электромагнитной системы, имеющего на шкале 30 делений и пределы измерения тока 1,5; 3; 7,5 и 15 А;

2) вольтметра электромагнитной системы, имеющего 150 делений шкалы и пределы измерения напряжений 150 и 300 В;

3) ваттметра электродинамической системы, имеющего 75 делений шкалы и три предела измерения тока 2,5; 5 и 10 А. Вольтметровая обмотка рассчитана на напряжение 150 В.

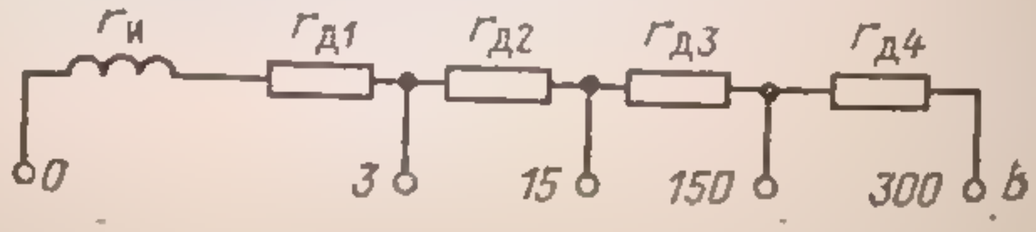


Рис. 6-14. К задаче 6-17.

6-19. Для проверки счетчика индукционной системы в цепь включен электродинамический ваттметр высокого класса точности. На щитке счетчика написано 1 кВт·ч — 5000 оборотов диска. Диск счетчика сделал 50 оборотов за 2 мин работы. При этом ваттметр показывал неизменную мощность 290 Вт. Определить постоянную счетчика и относительную погрешность его показаний. Являются ли показания счетчика завышенными или заниженными?

6-20. Микроамперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения тока 300 мкА и с внутренним сопротивлением 100 Ом желают использовать для измерения температур в нагревательной печи путем сочетания его с термопарой хромель — копель, имеющей удельную термо-э. д. с. 38,5 мкВ/°С*. Определить предельную температуру, которую можно измерять данным прибором, и цену деления шкалы прибора в °С/дел и в мкА/дел, если число делений всей шкалы равно 50.

---

* Удельная термо-э. д. с. задается в микровольтах на 1°С разности температур горячего спая термопары и окружающей среды.

Температуру окружающей среды принять равной 20°С.

6-21. Вольтметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения напряжения 250 В желают использовать в качестве тахометра для измерения частоты вращения двигателей. Для этой цели применяют магнитоэлектрические генераторы постоянного тока — тахогенераторы (датчики), напряжение которых пропорционально частоте вращения. К зажимам тахогенератора присоединяется вольтметр. При частоте вращения 4000 об/мин генератор дает напряжение 500 В. Определить предел частоты вращения, которую можно измерять указанным вольтметром, и цену деления его в В/дел и в об/(мин·дел), если число делений шкалы прибора равно 25.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7-1. НЕРАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, ИНДУКТИВНОСТЬЮ И ЕМКОСТЬЮ. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

7-1*. В цепи переменного тока с частотой $f=50$ Гц изменение тока происходит по закону $i=I_м \sin \omega t$, где $I_м=2{,}82$ А, угловая частота $\omega=2\pi f=314$ рад/с.

Написать выражения для мгновенных значений приложенного напряжения и мощности, показать векторную диаграмму тока и напряжения, кривые тока, напряжения и мощности и определить показания включенных в цепь измерительных приборов.

Условие 1. Цепь содержит одно активное сопротивление $r=60$ Ом (рис. 7-1). Определить также для этой цепи максимальную мощность и расход энергии за 8 ч работы.

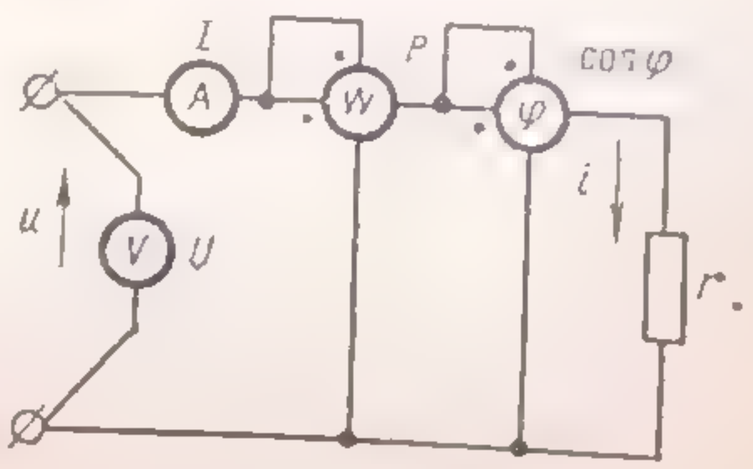


Рис. 7-1. К задаче 7-1.

Анализ и решение

Все соотношения для цепей постоянного тока справедливы также для мгновенных значений переменного тока. Поэтому для данной цепи можно написать:

$$u=ir, \qquad (1)$$

Отсюда $u=I_м r \sin \omega t$, где $U_м=I_м r=169$ В или $u=169 \sin \omega t$.

Умножив обе части уравнения (1) на i, получим выражение для мгновенной мощности $p=ui=i^2r=I_м^2 r \sin^2 \omega t$. Максимальная мощность $P_м=I_м^2 r=480$ Вт.

В данной цепи ток и напряжение совпадают по фазе. Векторная диаграмма и кривые тока, напряжения и мощности представлены на рис. 7-2.

Амперметр и вольтметр покажут действующие значения тока и напряжения

$$I = I_м/\sqrt{2} = 2{,}82/1{,}41 = 2\text{А},\quad U = U_м/\sqrt{2} = 120\text{ В}.$$

Фазометр показывает косинус угла сдвига фаз между током и напряжением. Для данной цепи $\cos\varphi = 1$, $\varphi = 0$.

В цепи переменного тока ваттметр показывает среднюю мощность P, равную половине максимальной. Поэтому

$$P = \frac{P_м}{2} = \frac{I_м^2 r}{2} = \frac{I_м^2 r}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{2}} = I^2 r = UI.$$

Следовательно, $P = 240$ Вт. Расход энергии за 8 ч работы выразится $W = Pt = 240\cdot 8 = 1920$ Вт·ч $= 1{,}92$ кВт·ч.

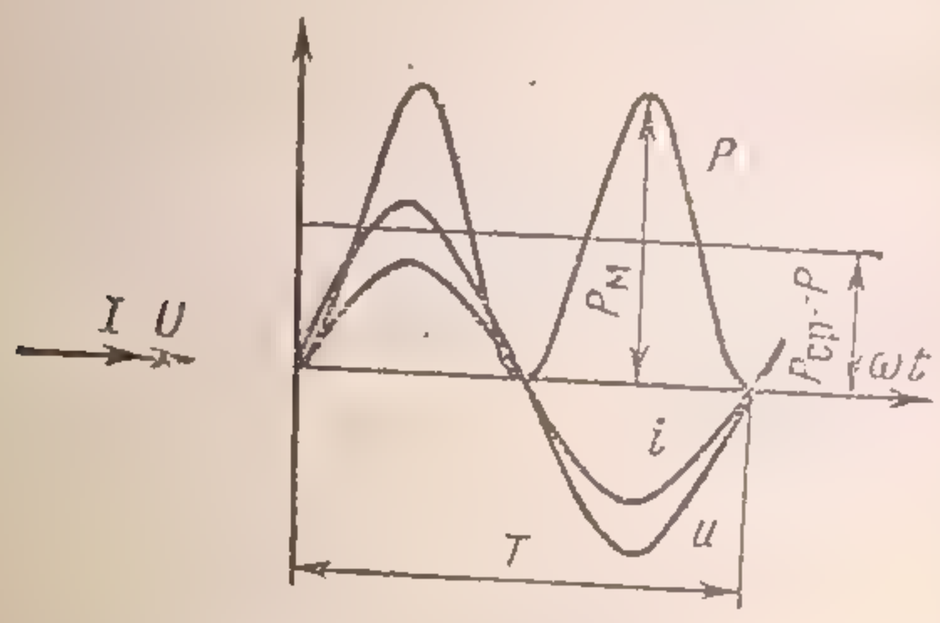


Рис. 7-2. К задаче 7-1.

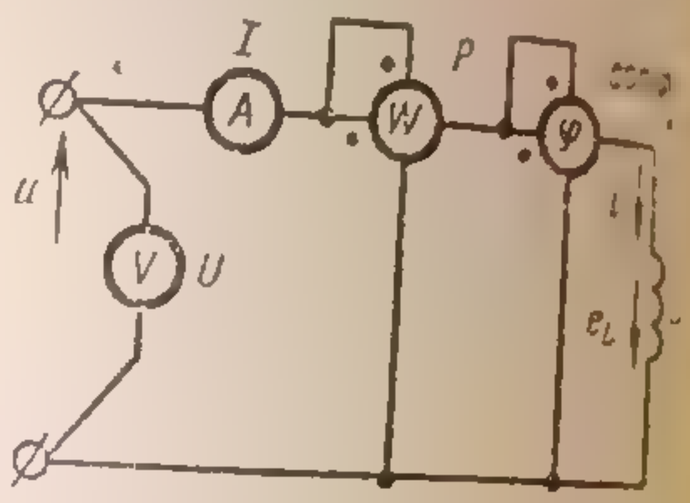


Рис. 7-3. К задаче 7-1.

Условие 2. Цепь содержит реактор, обладающий только индуктивностью $L = 0{,}255$ Г (активным сопротивлением пренебрегаем) рис. 7-3. Определить также для этой цепи реактивную мощность и максимальную энергию магнитного поля.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений (рис. 7-3) можно написать $u + e_L = 0$, где $e_L = -L\dfrac{di}{dt}$ — э. д. с. самоиндукции. Отсюда следует, что $u = -e_L = L\dfrac{di}{dt}$. Дифференцируя заданное выражение для тока, получаем:

$$u = L\omega I_м \cos\omega t = U_м \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (2)$$

Здесь $U_м = I_м\omega L = I_м x_L$, где $x_L = \omega L = 314\cdot 0{,}255 = 80$ Ом — индуктивное сопротивление индуктивности;

$$U_м = I_м x_L = 2{,}82\cdot 80 = 225\text{ В}.$$

Умножив обе части уравнения (2) на i, получим выражение для мгновенной мощности $p = ui = I_м U_м \sin\omega t\cos\omega t$. Разделив и умножив полученное выражение на 2, получим окончательно $p = IU\sin 2\omega t$.

В данной цепи напряжение опережает по фазе ток на 90°. Векторная диаграмма и кривые тока, напряжения и мощности представлены на рис. 7-4.

Амперметр и вольтметр покажут действующие значения тока и напряжения $I = I_м/\sqrt{2} = 2$А, $U = U_м/\sqrt{2} = 160$ В. Показание фазометра $\cos\varphi = 0$; $\varphi = 90°$. Кривая мощности (рис. 7-4) — синусоида удвоенной частоты, поэтому средняя мощность за период (показание ваттметра) равна нулю.

В первую четверть периода ток нарастает, реактор накапливает энергию в своем магнитном поле, мощность положительная.

Во вторую четверть периода ток и магнитный поток уменьшаются, реактор возвращает накопленную в нем энергию магнитного поля, мощность отрицательная.

Таким образом, реактор попеременно работает то как потребитель, то как генератор энергии, средняя мощность равна нулю. Мерой обмена энергией между источником и реактором является реактивная мощность.

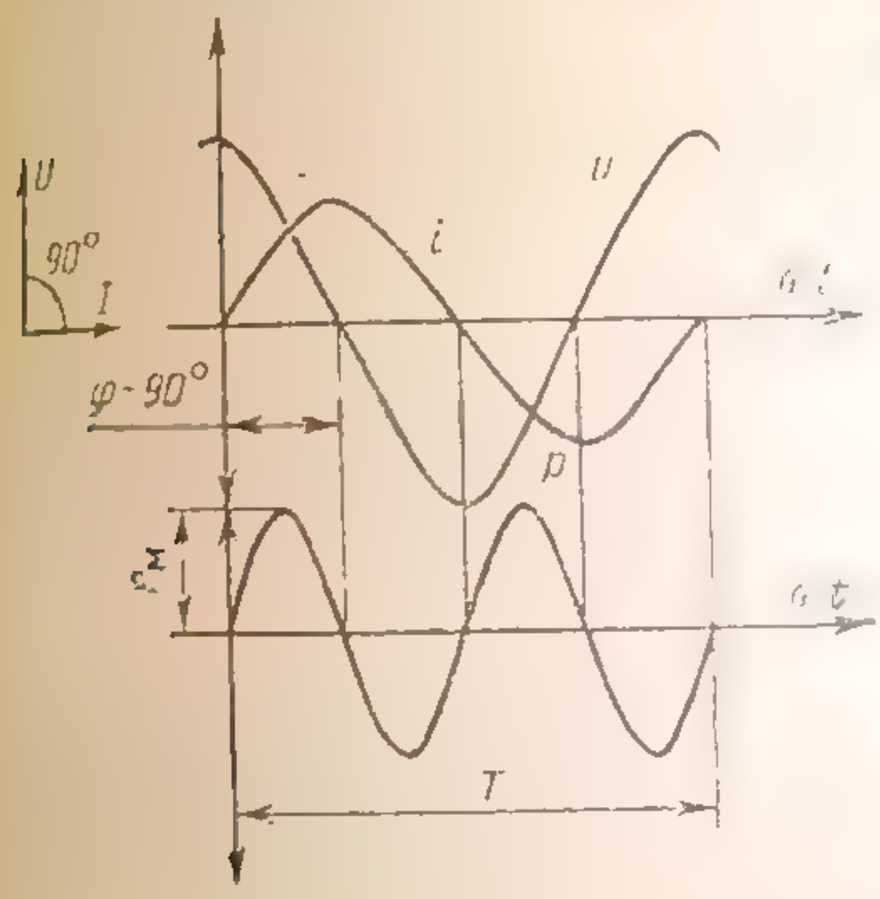


Рис. 7-4. К задаче 7-1.

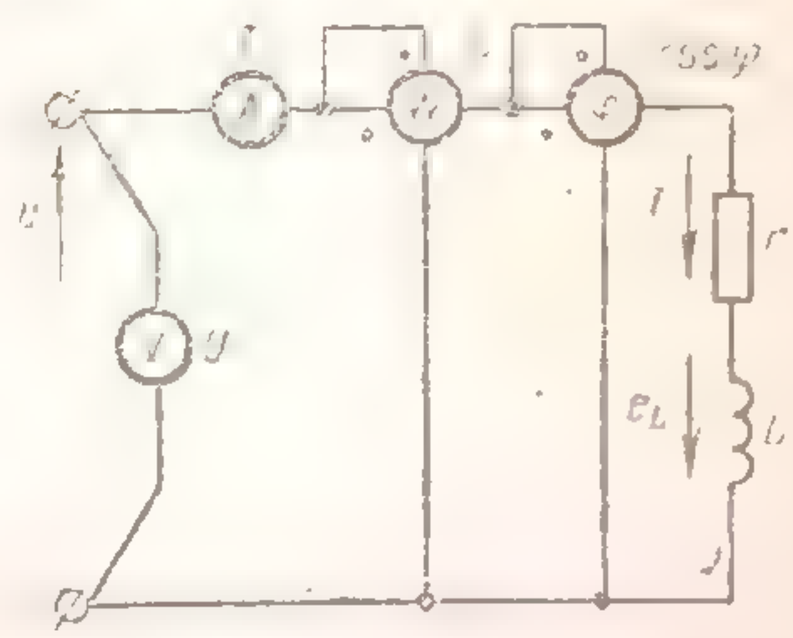


Рис. 7-5. К задаче 7-1.

Реактивная мощность $Q = UI = I^2 x_L = 320$ вар.

Энергия, запасаемая в магнитном поле реактора за четверть периода, $W_{маги.поля} = \int_0^{\frac{T}{4}} p\,dt$ (графически выражается площадью полуволны кривой мощности). Подставляя выражение для p, получаем

$$W_{маги.поля} = \int_0^{\frac{T}{4}} UI \sin 2\omega t\,dt = \frac{UI}{2\omega}\left|-\cos 2\omega t\right|_0^{\frac{T}{4}}.$$

Подставляя пределы интегрирования и учитывая, что $\omega = 2\pi f$, получаем

$$W_{маги.поля} = \frac{UI}{\omega} = \frac{Q}{\omega} = \frac{320}{314} = 1{,}02 \text{ Дж}.$$

Учитывая, что $Q=UI=I^2x_L=I^2\omega L$, можно получить другое выражение для энергии магнитного поля

$$W_{\text{магн.поля}}=\frac{Q}{\omega}=\frac{I^2\omega L}{\omega}=LI^2$$

или через максимальное значение тока $W_{\text{магн.поля}}=LI_м^2/2$.

Условие 3. Цепь содержит реактор, обладающий активным сопротивлением $r=60$ Ом и реактивным сопротивлением индуктивности $x_L=80$ Ом (рис. 7-5). Определить также для этой цепи реактивную и полную мощности.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений (рис. 7-5) можно написать $u+e_L=u$ или $u=ir+(-e_L)$. Теперь напряжение состоит из двух слагающих: активной $u_а=ir$, как в цепи

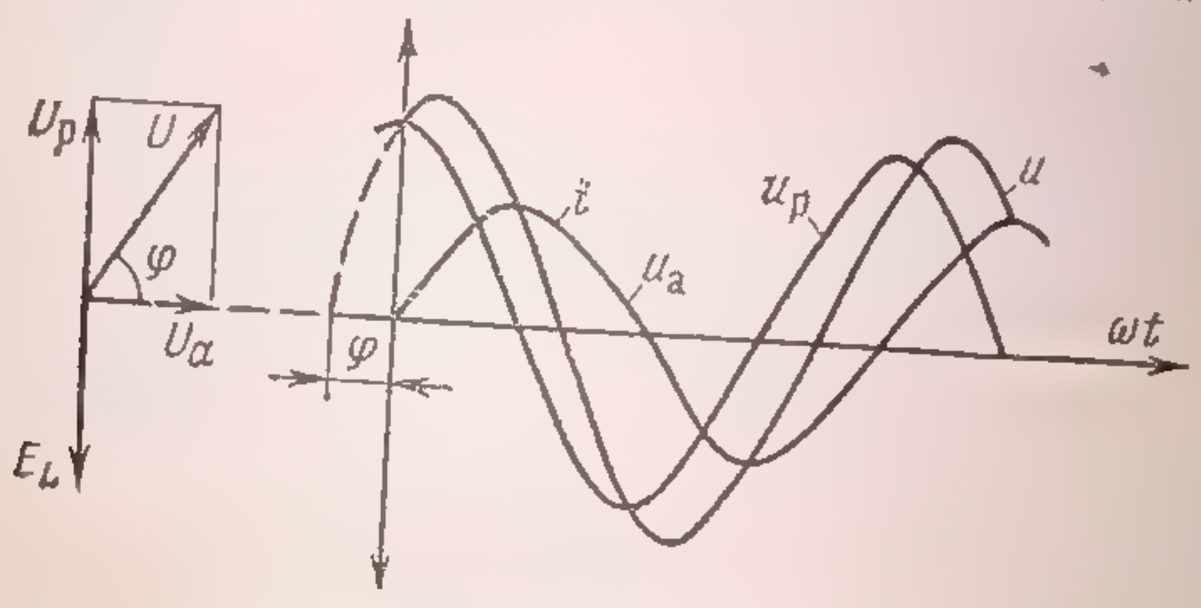


Рис. 7-6. К задаче 7-1.

с одним активным сопротивлением (условие I), и реактивной $u_р=-e_L$, как в цепи с одной индуктивностью, т. е.

$$u=u_а+u_р. \qquad (3)$$

Так как мгновенные значения определяются проекциями вращающихся векторов, а сумма мгновенных значений равна алгебраической сумме проекций векторов, то вектор общего напряжения должен быть равен геометрической сумме векторов слагаемых напряжений, т. е. $\overline{U}=\overline{U}_а+\overline{U}_р$. Векторная диаграмма и кривые тока и напряжения представлены на рис. 7-6. Из векторной диаграммы следует, что

$$U=\sqrt{U_а^2+U_р^2}=\sqrt{I^2r^2+I^2x_L^2}=I\sqrt{r^2+x_L^2}=Iz,$$

где $z=\sqrt{r^2+x_L^2}$ — полное сопротивление цепи, $z=\sqrt{60^2+80^2}=100$ Ом. Показание амперметра $I=\frac{I_м}{\sqrt{2}}=2$ А, показание вольтметра $U=Iz=2\cdot100=200$ В. Максимальное значение напряжения

$$U_м=200\cdot\sqrt{2}=282\text{ В}.$$

Из векторной диаграммы видно, что $u = U_м \sin(\omega t + \varphi)$, где φ — угол сдвига фаз между током и напряжением:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_р}{U_а} = \frac{Ix_L}{Ir} = \frac{x_L}{r} = \frac{80}{60} = 1{,}33.$$

Аналогично получим $\cos\varphi = \frac{r}{z} = 0{,}6$ (показание фазометра); $\sin\varphi = 0{,}8$, откуда $\varphi \approx 53°$. Мгновенное напряжение теперь выразим окончательно $u = 282 \sin\left(\omega t + \frac{53}{180}\pi\right)$, где угол $\frac{53}{180}\pi$ — угол φ в относительных единицах.

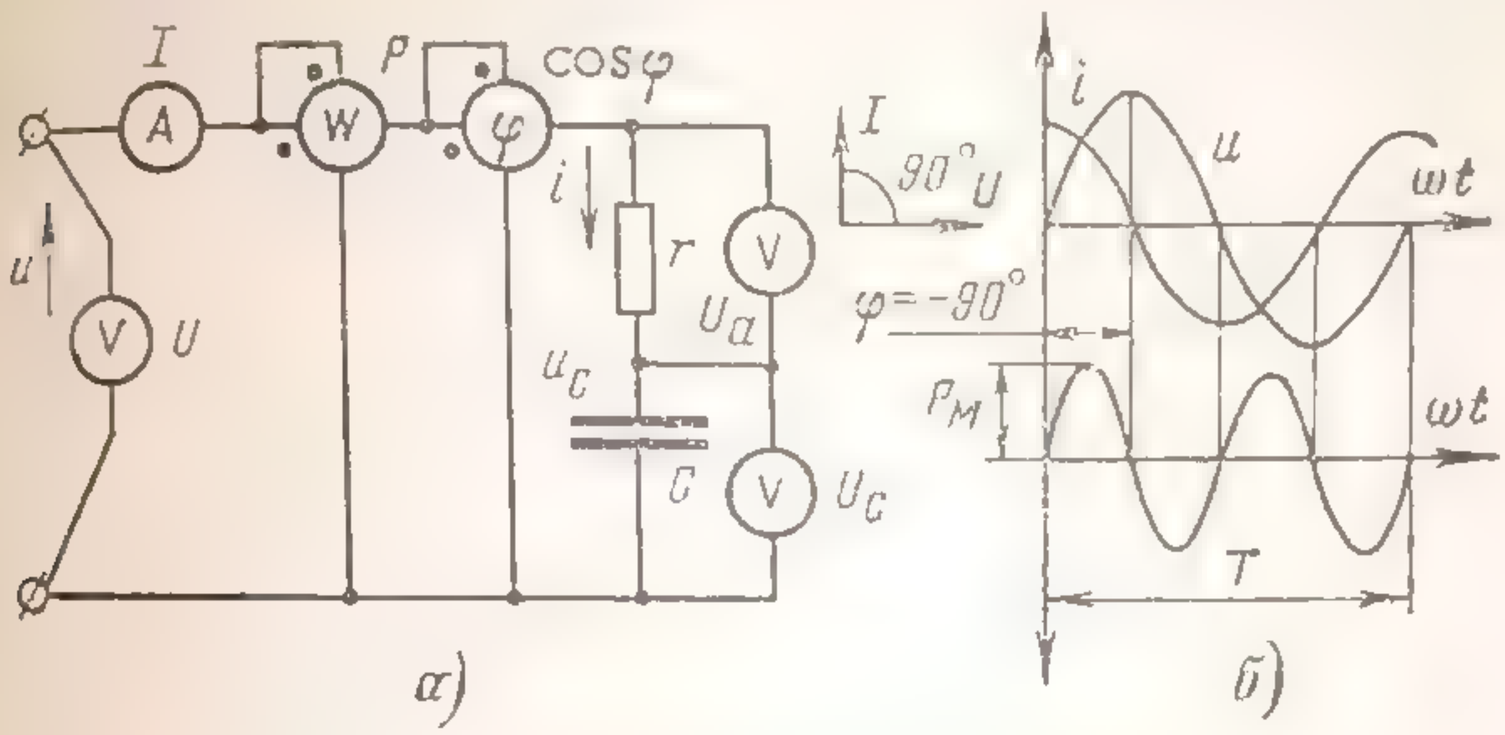


Рис. 7-7. К задачам 7-2, 7-17, 7-18.

Умножая обе части уравнения (3) на ток i, получаем выражение для мгновенной мощности: $p = ui = u_а i + u_р i$.

Мгновенная мощность также состоит из двух слагающих: активной $p_а = u_а i = i^2 r$, график которой представлен на рис. 7-2, и реактивной $p_р = u_р i$, график которой представлен на рис. 7-4.

Средняя мощность равна средней активной мощности $P = P_а$, так как средняя реактивная мощность равна нулю.

Средняя мощность (показание ваттметра) $P = P_а = I^2 r = U_а I$. Заменяя $U_а = U\cos\varphi$ (из векторной диаграммы), получаем общее выражение для средней мощности переменного тока $P = UI\cos\varphi$.

Для данной задачи $P = 200 \cdot 2 \cdot 0{,}6 = 240$ Вт

Реактивная мощность $Q = I^2 X_L = U_р I$. Заменяя $U_р = U\sin\varphi$ (из векторной диаграммы), получаем общее выражение для реактивной мощности $Q = UI\sin\varphi$.

Для данной задачи $Q = 200 \cdot 2 \cdot 0{,}8 = 320$ вар.

Полная мощность $S = UI = 200 \cdot 2 = 100$ вольт-ампер (В·А)[1].

7-2*. В цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью $C = 40$ мкФ (рис. 7-7, *а*) изменение напряжения происходит по закону $u = U_м \sin\omega t$, где $U_м = 225$ В, $\omega = 311$ рад/с. Написать выражение для мгновенных значений тока и мощности, показать векторную диаграмму тока и напряжения, кривые тока, напряжения и мощности и определить показания включенных в цепь измерительных приборов.

---

[1] Полная мощность — расчетная величина. Она показывает, какую мощность при том же токе и напряжении мог бы передать источник, если бы коэффициент мощности потребителя ($\cos\varphi$) был равен единице.

Условие 1. $r=0$. Определить также для этой цепи реактивную мощность и максимальную энергию электрического поля конденсатора.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений можно написать $u-u_C=ir$. При $r=0$ $u-u_C=0$ и $u=u_C$. Ток в цепи $i=dq/dt$, где $q=Cu_C$ — мгновенное значение заряда на обкладках конденсатора. Тогда $i=\dfrac{dCu_C}{dt}=C\dfrac{du_C}{dt}$. Дифференцируя заданное выражение для напряжения, получаем

$$i=C\omega U_м\cos\omega t=I_м\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right),$$

где $I_м=U_м\,\omega C$ или $I_м=\dfrac{U_м}{1/\omega C}=\dfrac{U_м}{x_C}$.

Реактивное сопротивление емкости

$$x_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{10^6}{314\cdot 40}=80\text{ Ом},$$

максимальный ток $I_м=U_м/x_C=2{,}82$ А и действующее значение тока (показание амперметра) $I=I_м/\sqrt{2}=2$А. Показание вольтметра $U=U_м/\sqrt{2}=160$ В.

Сопоставляя данную задачу с задачей 7-1 (условие 2), легко видеть, что в отличие от цепи с одной индуктивностью в данной цепи ток опережает напряжение на $^1/_4\,T$ ($\varphi=-90°$). Векторная диаграмма и графики тока, напряжения и мощности показаны на рис. 7-7, *б*. В первую четверть периода, когда напряжение нарастает, конденсатор заряжается, накапливая энергию в своем электрическом поле, *мощность положительна*. Во вторую четверть периода напряжение убывает, конденсатор разряжается, возвращая накопленную в нем энергию обратно источнику, *мощность отрицательна*. Средняя мощность за период равна нулю. Реактивная мощность $Q=UI=I^2x_C=320$ вар.

Энергия, запасаемая в электрическом поле конденсатора, выразится так же, как для реактора (задача 7-1, условие 2):

$$W_{эл.поля}=UI/\omega=Q/\omega=1{,}02\text{ Дж}.$$

Учитывая, что $Q=UI=U\dfrac{U}{x_C}=U^2\omega C$, можно получить другое выражение для энергии электрического поля конденсатора $W_{эл.поля}=CU^2$, или через максимальное значение напряжения можно получить $W_{эл.поля}=CU_м^2/2$.

Условие 2. $r=60$ Ом. Определить также для этой цепи реактивную и полную мощности.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений (рис. 7-7, *а*), можно написать $u-u_C=-ir$ или $u=-ir+u_C=u_a+u_C$.

$i = I_m \sin(\omega t - \varphi_i)$.

В остальном ... же, как задача 7-1 ...

Вопросы и упражнения

1. В цепи ... току

$$i = 16{,}1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ А}.$$

Определить ... мгновенную и среднюю мощности в цепи.

2. Реактор с индуктивностью 40,5 мГ включен в сеть ...

$$u = 127\sqrt{2} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Определить показания амперметра и вольтметра (рис. 7-3); среднюю и максимальную ... построить векторную ... мощности в цепи.

3. Как изменятся ток, ... тора с ничтожным активным сопротивлением, если при неизменном напряжении частоту увеличить в 2 раза?

Указание. Для решения ... для индуктивности $L = \mu \omega^2 S l$ ... $= 2\pi f L$ и т. д. с. $E_L = \omega \Phi_m$.

4. Как изменятся ток и магнитный ... ным активным сопротивлением ... намотать на нее вдвое больше ... ложенное к реактору напряжение ...

Указание. То же, что и для примера 3.

5. Как изменятся ток и магнитный поток в ... ным активным сопротивлением, если при том же числе витков ... реактор с магнитопроводом а) вдвое большего сечения, б) ... большей длины. Частота сети и приложенное к ... предполагаются неизменными.

Указание. То же, что и для примера 3.

6. Как изменятся ток и магнитный поток в реакторе с ничтожным активным сопротивлением, если при ... приложенное напряжение вдвое увеличится?

7. В сеть переменного тока с частотой 50 гц включены реактор и измерительные приборы по схеме рис. 7-3. Показания приборов следующие: $I = 20$ А, $U = 120$ В, $P = 2$ кВт. Определить показание фазометра, активное сопротивление и индуктивность реактора, полную и реактивную мощности.

8. В цепи переменного тока мгновенные значения тока и напряжения представляются выражениями: $i=20\sin 6280t$ мА; $u=100\sin(6280t-\pi/2)$ В. Определить показания амперметра и вольтметра в цепи, частоту тока и напряжения, емкость конденсатора, реактивную мощность и энергию электрического поля конденсатора при максимальном напряжении.

9. Для цепи рис. 7-7, *а* мгновенные значения тока и напряжения представляются выражениями $u=169\sin(\omega t-\pi/2)$; $i=5{,}64\sin(\omega t-\pi/6)$. Построить векторную диаграмму и определить показания всех измерительных приборов.

10. Напряжение и ток в цепи определяются уравнениями:

а) $i=14{,}1\sin(314t-20°)$; $u=310\sin(314t+40°)$;

б) $i=14{,}1\sin(314t+90°)$; $u=310\sin(314t+150°)$;

в) $i=14{,}1\sin(314t+90°)$; $u=310\sin(314t+180°)$;

г) $i=14{,}1\sin(314t+90°)$; $u=310\sin(314t+90°)$.

Указать, какие из приведенных уравнений относятся к цепи с одной индуктивностью, с одним активным сопротивлением, с активным сопротивлением и емкостью, с активным сопротивлением и индуктивностью.

7-3. В цепи переменного тока с одним активным сопротивлением средняя мощность, расходуемая в цепи, равна 400 Вт, сопротивление цепи $r=16$ Ом. Определить ток и напряжение на выводах цепи.

7-4. В цепи синусоидального тока с одним активным сопротивлением переменная мощность достигает максимального значения $P_м=200$ Вт; напряжение на выводах цепи $U=50$ В. Определить сопротивление r и ток в цепи I.

7-5. От сети переменного тока напряжением $U=220$В, $f=50$ Гц питается группа ламп, сопротивление которой $r=11$ Ом (рис. 7-1). Написать аналитическое выражение мгновенных значений тока и напряжения в цепи, построить векторную диаграмму тока и напряжения, кривые тока, напряжения и мощности. Определить максимальную мощность, среднюю мощность и расход энергии за время $t=6$ ч работы. Как изменятся мощность и расход энергии, если частоту увеличить в 2 раза?

7-6. Катушка с ничтожным активным сопротивлением и индуктивностью 11,15 мГ присоединена к сети переменного тока напряжением 70 В. При этом в цепи устанавливается ток, действующее значение которого 20 А. Число витков катушки 50. Определить частоту переменного тока и максимальный магнитный поток.

7-7. В реакторе с ничтожным активным сопротивлением и индуктивностью 31,8 мГ индуктируется э. д. с. $E_L=100$ В. Максимальная энергия, накапливаемая в магнитном поле, $W_м=1{,}588$ Дж. Определить частоту, ток в катушке, реактивную мощность, напряжение сети и максимальный магнитный поток, если число витков реактора 100. Построить векторную диаграмму тока, магнитного потока, э. д. с. и напряжения для начального момента времени $t=0$, если э. д. с. изменяется по закону $e=E_м\sin(\omega t-90°)$.

7-8. Как изменится напряжение для предыдущей задачи, если при прочих равных условиях активное сопротивление реактора $r=10$ Ом. Построить для этого случая векторную диаграмму.

7-9. Реактор, обладающий активным сопротивлением $r=8$ Ом и индуктивностью $L=0{,}0191$ Г, включен под напряжение $u=179\sin 314t$ В.

Условие 1. Написать выражения мгновенных значений тока, э. д. с. самоиндукции, реактивной и активной слагающих напряжения. Построить векторную диаграмму и кривые изменения указанных величин.

Условие 2. Определить показания амперметра, вольтметра, ваттметра и фазометра, включенных в цепь ротора, как указано на схеме рис. 7-5.

7-10. При включении реактора в сеть переменного тока с напряжением 120 В и частотой 50 Гц по ней проходит ток 4 А. При включении того же реактора в сеть постоянного тока с напряжением 50 В по нему проходит постоянный ток 5 А. Определить индуктивность реактора.

7-11. В сеть переменного тока с частотой 50 Гц включены реактор и измерительные приборы — амперметр, вольтметр, ваттметр и фазометр по схеме рис. 7-5. Показания приборов следующие: $I=5$ А, $U=220$ В, $\varphi=45°30'$. Определить показание ваттметра, активное и реактивное сопротивления реактора и реактивную мощность реактора.

7-12. Как изменятся показания приборов цепи реактора предыдущей задачи, если при том же напряжении частота сети будет равна 500 Гц. Определить в этом случае реактивное сопротивление реактора и потребляемые им активную и реактивную мощности.

7-13. Напряжение и ток в цепи определяются уравнениями, данными в упражнении 10 к задачам 7-1 и 7-2.

Для всех случаев дать схему цепи с указанием типа нагрузки и определить мощность, расходуемую в цепи, активное и реактивное сопротивления, реактивную и полную мощности. Определить также показания амперметра и вольтметра в цепи.

7-14. Нагревательный прибор, обладающий одним активным сопротивлением и потребляющий мощность P, рассчитан на номинальное напряжение $U_н=220$ В.

Прибор включается в цепь переменного тока при частоте 50 Гц более высокого напряжения U. Для того чтобы на приборе было напряжение, равное номинальному, последовательно с ним включается реактор с ничтожным активным сопротивлением (рис. 7-9). Определить, какова должна быть при этом индуктивность реактора, какое напряжение придется на этот реактор и чему равен коэффициент мощности всей установки?

U, В	380	380	500	500
P, Вт	200	500	500	1000

7-15. Два конденсатора емкостью $C=0{,}5$ мкФ каждый присоединены параллельно к сети переменного тока с частотой $f=50$ Гц. Напряжение на выводах конденсатора изменяется по закону $u=179\sin\omega t$ В.

Условие 1. Написать выражения для мгновенных значений тока и заряда обоих конденсаторов. Построить для тока и напряжения векторную диаграмму и определить максимальную энергию, запасаемую в электрическом поле каждого конденсатора.

Условие 2. Построить кривые тока, напряжения и мощности конденсаторов. Определить максимальную и среднюю мощности.

7-16. Батарея конденсаторов, состоящая из трех параллельных групп по четыре конденсатора в каждой группе (рис. 7-10), присоединена к сети переменного тока напряжением 220 В. Емкость каждого конденсатора 2 мкФ.

Условие 1. Определить ток I в неразветвленной части цепи, ток каждого конденсатора I_C, напряжение на каждом конденсаторе U_C, реактивную мощность Q и Q_C, энергию электрического поля W и W_C всей батареи и каждого конденсатора, если частота сети $f=50$ Гц.

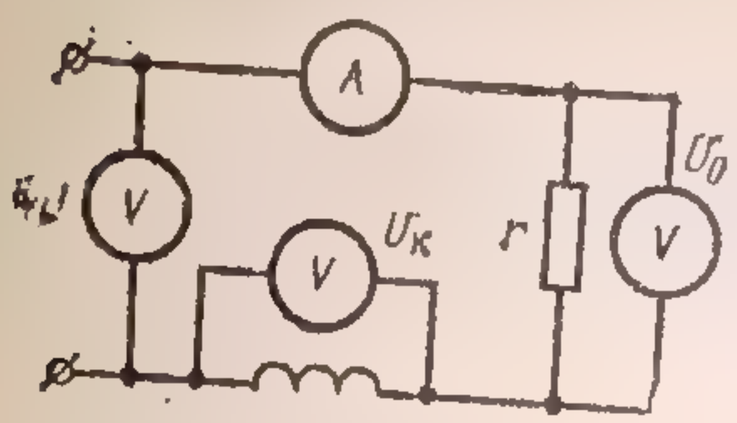


Рис. 7-9. К задаче 7-14.

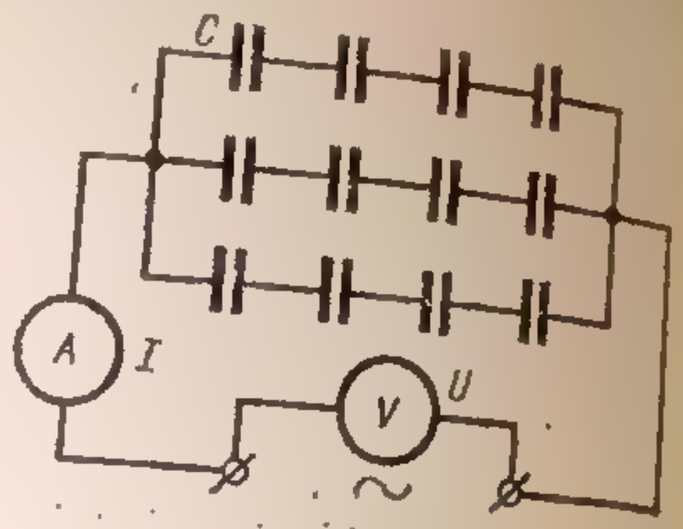


Рис. 7-10. К задаче 7-16.

Условие 2. Определить ток, реактивную мощность и энергию электрического поля батареи конденсаторов, если частота сети $f=500$ Гц. Решение задачи сравнить с решением по условию 1.

7-17. Для цепи рис. 7-7, *а* мгновенные значения тока и напряжения представляются выражениями:

$$u = 169 \sin(\omega t - 90°) \text{ В}; \quad i = 5{,}64 \sin(\omega t - 30°) \text{ А}.$$

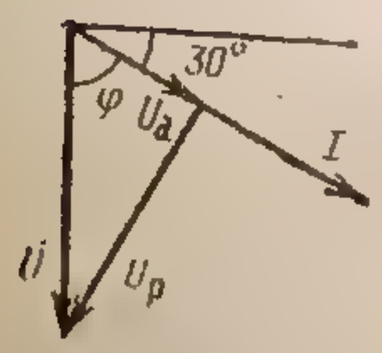


Рис. 7-11. К задаче 7-17.

Определить активное сопротивление, емкость конденсатора, реактивную мощность и энергию, накопленную в электрическом поле конденсатора, для момента времени $t=1/200$ с. Задачу решить при частоте сети 0, 100, 200, 1000, 10 000 и 100 000 Гц.

Указание. Векторная диаграмма для данной цепи представлена на рис. 7-11. Векторы показаны в положении для начального момента времени $t=0$. Как видно из диаграммы и из аналитических выражений, ток опережает по фазе напряжение на угол $\varphi=(\omega t-30°)-(\omega t-90°)=60°$.

Для определения мгновенного значения энергии электрического поля конденсатора нужно написать уравнение для мгновенных значений напряжения конденсатора $u_C=u_p$. Как видно из векторной диаграммы, $u_p=U_{p\,м}\sin(\omega t-120°)$, $U_{p.м}=U_p\sqrt{2}=U\sqrt{2}\sin\varphi$.

Теперь мгновенное значение энергии электрического поля конденсатора может быть найдено из формулы

$$w=\frac{Cu_p^2}{2}=CU^2\sin^2\varphi\sin^2\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right).$$

[illegible] [illegible] [illegible] $I = I_0 \left[\quad \right]$?

[illegible] получаем требуемые результаты

7-18. В цепь переменного тока с напряжением 10 В (рис. 7-7, а) включено активное сопротивление 1 Ом и емкость 265 мкФ. Определить ток в цепи при частоте $f=0$ (цепь постоянного тока), 25, 50, 100 и 1000 Гц. По полученным данным построить кривую изменения тока в цепи в зависимости от частоты

7-19. Напряжение U_{AB} между проводами A и B [illegible] переменного тока с частотой 50 Гц. Один из проводов оборвался и к соответствующему с трансформатором концу провода прикоснулся человек, образовав, таким образом, последовательную цепь (от выхода A через тело человека — землю — емкость провода B относительно земли к проводу B). Определить, какой ток пройдет через тело человека и под каким напряжением он окажется, если длина линии l, емкость провода относительно земли равномерно распределена по всей длине линии и составляет $C_0=0{,}01$ мкФ/км. Задачу решить для двух случаев: $l_1=$ [illegible] км и $l_2=1$ км. Сопротивлением земли пренебрегаем.

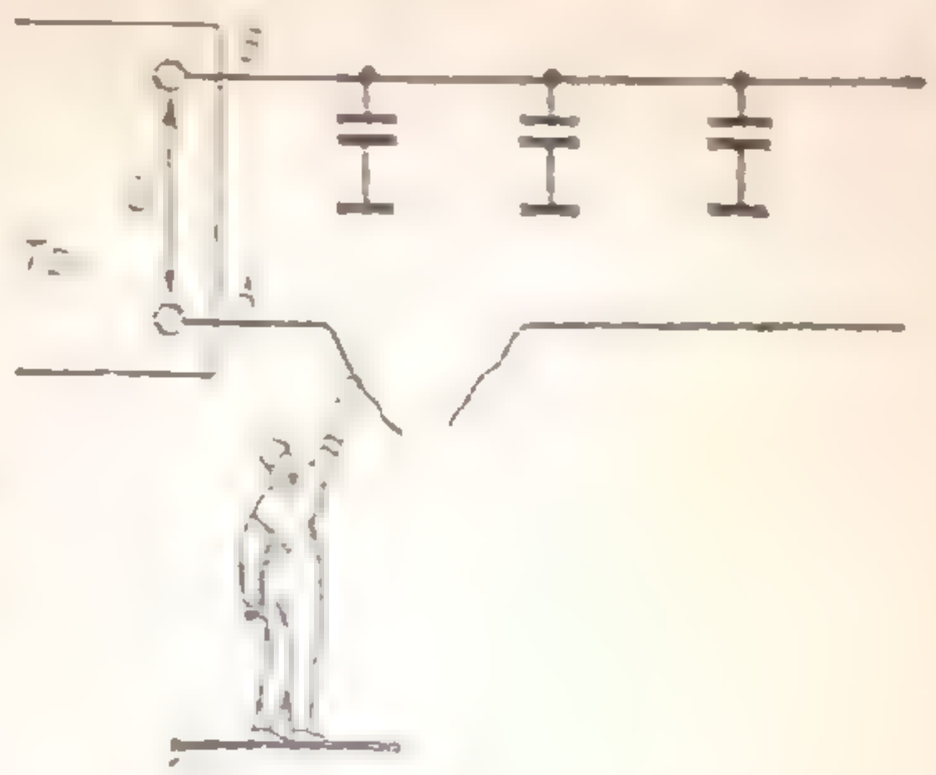


Рис. 7-12. К задаче 7-19.

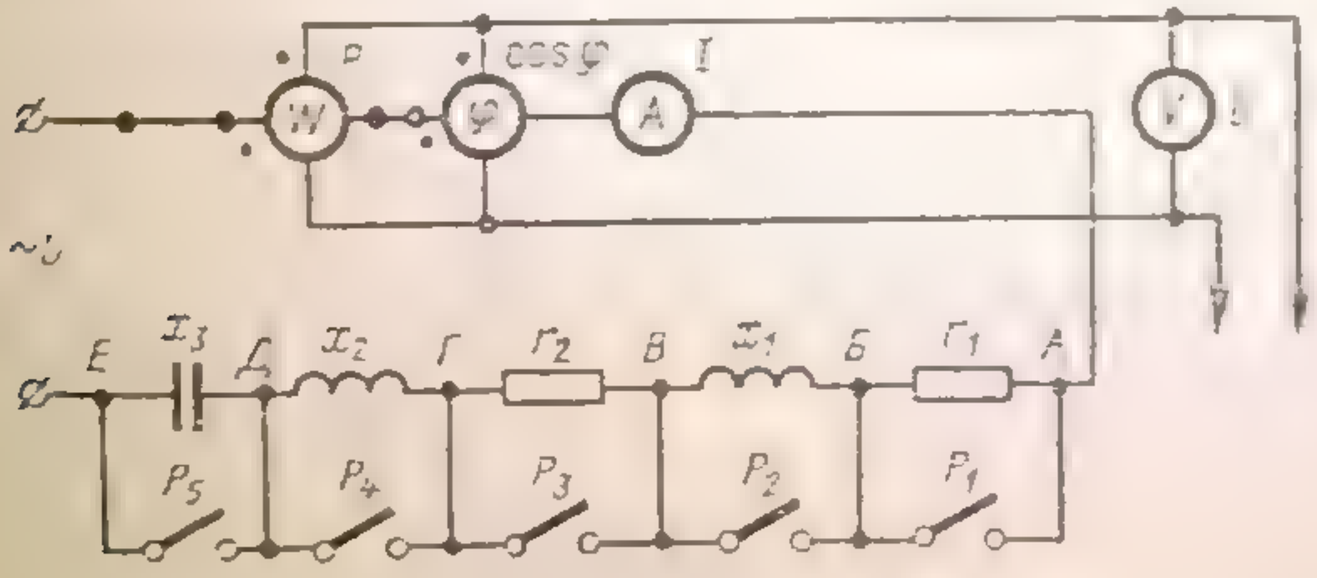


Рис. 7-13. К задаче 7-20

Условие 1. Сопротивление тела человека 10^5 Ом.

Условие 2. Сопротивление тела человека 50 000 Ом.

7-20*. Для цепи, изображенной на рис. 7-13, $r_1=8$ Ом, $x_1=2$ Ом, $r_2=3$ Ом; $x_2=10$ Ом; $x_3=12$ Ом. Приложенное напряжение U [illegible] $=65$ В, частота $f=50$ Гц. Присоединяя свободные концы, идущие от вольтметра и параллельных обмоток ваттметра и фазометра, к различным точкам цепи, определить показания всех измерительных приборов и показать векторную диаграмму для следующих условий

Условие 1. Замкнуты однополюсные рубильники P_2 и P_5. Определіть также реактивную и полную мощности цепи.

Анализ и решение

При замкнутых однополюсных рубильниках P_2 и P_5 цепь состоит из двух последовательно соединенных участков: первого ($АБ$) с активным сопротивлением r_1 и второго ($ВД$) с активным r_2 и индуктивным x_2 сопротивлениями. Векторная диаграмма для такой цепи показана на рис. 7-14. На диаграмме U_{a2} и U_{p2} — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения на втором участке.

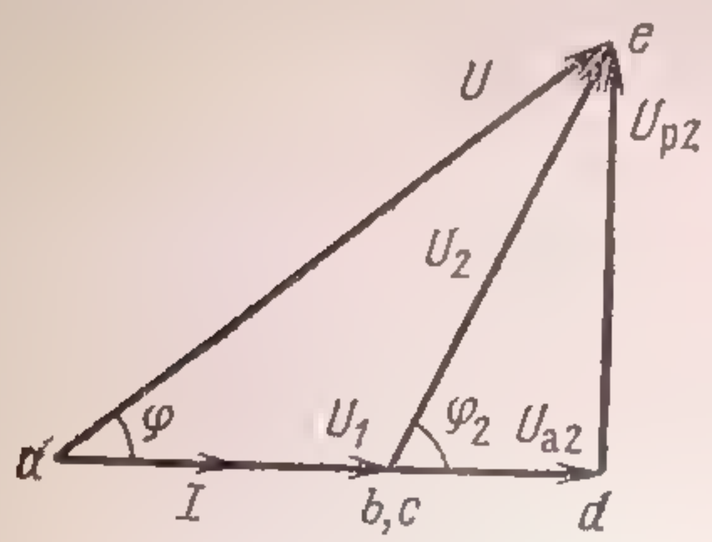


Рис. 7-14. К задаче 7-20.

В неразветвленной цепи при одном и том же токе на всех участках напряжения пропорциональны соответствующим сопротивлениям, поэтому из векторной диаграммы следует, что полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x_2^2} = \sqrt{(8 + 3)^2 + 10^2} = 14{,}9 \text{ Ом}.$$

Тогда ток в цепи выразится:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{65}{14{,}9} = 4{,}36 \text{ А}.$$

При присоединении свободных концов к выводам $А$ и $Б$ показания приборов будут:

$$U_1 = Ir_1 = 4{,}36 \cdot 8 = 35 \text{ В}; \quad P_1 = I^2 r_1 = U_1 I = 153 \text{ Вт};$$

$$\cos \varphi_1 = 1 \ (\varphi_1 = 0°).$$

При присоединении свободных концов к выводам $В$ и $Д$:

$$U_2 = Iz_2,$$

где z_2 — полное сопротивление участка $ВД$, обладающего активным сопротивлением и индуктивностью, $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = 10{,}45$ Ом. Следовательно, $U_2 = Iz_2 = 4{,}36 \cdot 10{,}45 = 45{,}6$ В; $P_2 = I^2 r_2 = 57$ Вт, $\cos \varphi_2 = r_2/z_2 = 0{,}287$.

При присоединении свободных концов к выводам $А$ и $Е$:

$$U = 65 \text{ В}; \quad P = I^2 (r_1 + r_2) = 210 \text{ Вт}; \quad \cos \varphi = \frac{r_1 + r_2}{z} = 0{,}738.$$

Реактивная мощность в цепи $Q = I^2 x_2 = UI \sin \varphi = 191$ вар и полная мощность $S = UI = 285$ В·А.

Условие 2. Замкнут рубильник P_5. Определить также реактивные мощности и составить уравнения баланса мощностей.

Анализ и решение

При замкнутом рубильнике P_5 цепь состоит из двух последовательно соединенных участков реакторов, каждый из которых — $АВ$ или $ВД$ — обладает активным сопротивлением и индуктивностью.

Векторная диаграмма для такой цепи показана на рис. 7-15. На диаграмме векторы U_{a1}, U_{a2}, U_{p1} и U_{p2} выражают соответственно активные и реактивные составляющие напряжений участков, U_a и U_p — активную и реактивную составляющие общего напряжения. При одном и том же токе напряжения пропорциональны соответствующим сопротивлениям. Из векторной диаграммы следует, что полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \sqrt{(8 + 3)^2 + (2 + 10)^2} = 16{,}25 \text{ Ом}.$$

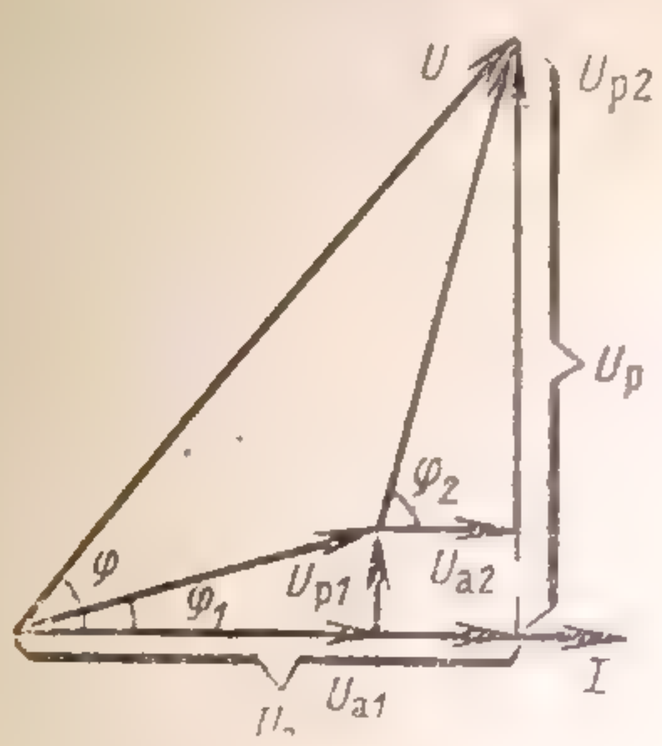


Рис. 7-15. К задаче 7-20.

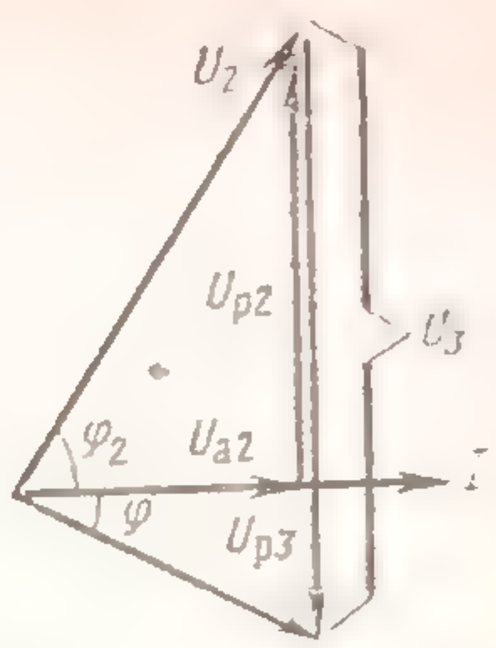


Рис. 7-16. К задаче 7-20.

Ток в цепи выразится:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{65}{16{,}25} = 4 \text{ А}.$$

При присоединении свободных концов к выводам A и B показания приборов будут:

$$U_1 = Iz_1 = 4 \cdot 8{,}25 = 33 \text{ В},$$

где $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = 8{,}25$ Ом — полное сопротивление первого участка;

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{8}{8{,}25} = 0{,}97; \quad P_1 = I^2 r_1 = U_1 I \cos \varphi_1 = 128 \text{ Вт}.$$

При присоединении свободных концов к выводам B и $Д$:

$$U_2 = Iz_2 = 4 \cdot 10{,}45 = 40{,}8 \text{ В},$$

где $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_1^2} = 10{,}45$ Ом — полное сопротивление второго участка;

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = 0{,}287; \quad P_2 = I^2 r_2 = U_2 I \cos \varphi_2 = 48 \text{ Вт}.$$

При присоединении свободных концов к выводам A и $Д$:

$U = 65$ В; $\cos \varphi = \dfrac{r_1 + r_2}{z} = \dfrac{11}{16{,}25} = 0{,}68$; $P = I^2 (r_1 + r_2) = UI \cos \varphi =$ $= 176$ Вт.

Реактивные мощности:

$$Q_1 = I^2 x_1 = U_1 I \sin\varphi_1 = 32 \text{ вар}; \quad Q_2 = I^2 x_2 = U_2 I \sin\varphi = 160 \text{ вар};$$

$$Q = I^2 (x_1 + x_2) = UI \sin\varphi = 192 \text{ вар}.$$

Балансы мощностей:

$$P = P_1 + P_2; \; 176 = 128 + 48 \text{ Вт}; \; Q = Q_1 + Q_2; \; 192 = 32 + 160 \text{ вар}.$$

Условие 3. Замкнуты рубильники P_1 и P_2. Определить такие же реактивные мощности, максимальную энергию магнитного поля реактора и электрического поля конденсатора. Проверить баланс мощностей.

Анализ и решение

При замкнутых рубильниках P_1 и P_2 цепь состоит из двух последовательно соединенных участков: реактора, обладающего активным r_2 и реактивным x_2 сопротивлениями, и емкости с реактивным сопротивлением x_3. Векторная диаграмма для такой цепи показана на рис. 7-16. На диаграмме векторы U_{a2}, U_{p2}, U_{p3}, U_p выражают соответственно активную составляющую напряжения реактора, реактивные составляющие напряжений реактора, конденсатора и общего. При одном и том же токе напряжения пропорциональны соответствующим сопротивлениям. Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r_2^2 + (x_2 - x_3)^2} = \sqrt{9 + (10 - 12)^2} = 3{,}6 \text{ Ом}.$$

Ток в цепи $I = \dfrac{U}{z} = \dfrac{65}{3{,}6} = 18 \text{ А}$.

При присоединении свободных концов к выводам *ВД* показания приборов будут:

$$U_2 = Iz_2 = 18 \cdot 10{,}4 = 187 \text{ В},$$

где $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = 10{,}4$ Ом — полное сопротивление реактора;

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{10{,}4} \approx 0{,}29; \; P_2 = I^2 r_2 = U_2 I \cos\varphi_2 = 980 \text{ Вт}.$$

При присоединении свободных концов к выводам *ДЕ*:

$$U_3 = Ix_3 = 18 \cdot 12 = 216 \text{ В}; \; P_3 = 0,$$

так как $\cos\varphi_3 = 0$ ($\varphi_3 = -90°$).

При присоединении свободных концов к выводам *ВЕ*:

$$U = 65 \text{ В}; \; \cos\varphi = \frac{r_2}{z} = \frac{3}{3{,}6} = 0{,}833; \; P = I^2 r_2 = UI \cos\varphi = 980 \text{ Вт}.$$

Реактивные мощности:

$$Q_2 = I^2 x_2 = U_2 I \sin\varphi_2 = 3260 \text{ вар}; \; Q_3 = I^2 x_3 = 3910 \text{ вар};$$

$$Q = I^2 x = IU_p = UI \sin\varphi = 650 \text{ вар}.$$

Балансы мощностей

$$P = P_2 = 980 \text{ Вт}; \; Q = Q_3 - Q_2; \; 650 = 3910 - 3260.$$

Следует обратить внимание на то, что при последовательном соединении реактора и конденсатора напряжения на них могут значительно превышать приложенное (перенапряжения). Это объясняется тем, что конденсатор и реактор представляют совместно с источником питания (генератором) колебательный контур, в котором имеет место накопление электромагнитной энергии, периодически передаваемой от конденсатора к реактору и наоборот.

Запас энергии магнитного поля катушки $W_{\text{магн.поля}} = \frac{Q_2}{\omega} = \frac{3260}{314} = 10{,}4$ Дж, запас энергии электрического поля конденсатора $W_{\text{эл.поля}} = \frac{Q_3}{\omega} = 12{,}5$ Дж ($\omega = 2\pi f = 314$ рад/с — угловая частота).

Разница в реактивной энергии 2,1 Дж компенсируется за счет источника питания, который, кроме того, покрывает расход активной энергии в активном сопротивлении.

7-21*. Цепь состоит из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 10$ кОм, реактора с ничтожным активным сопротивлением и индуктивностью $L = 80$ мГ и конденсатора с емкостью $C = 3140$ мкФ (рис. 7-17). К выводам цепи приложено синусоидальное напряжение с действующим значением $U = 200$ В. Частота изменяется от 0 до 1 МГц. Определить частоту $f_{\text{рез}}$, при которой имеет место резонанс напряжений.

Рис. 7-17. К задачам 7-21, 7-22.

Построить кривые изменения тока и напряжений на всех участках цепи в зависимости от частоты и определить угол сдвига фаз между током и напряжением.

Анализ и решение

Условием резонанса напряжений является равенство реактивных сопротивлений индуктивности и емкости, т. е

$$x_L = x_C;\ \omega L = 1/\omega C;\ 2\pi f_{\text{рез}} L = 1/2\pi f_{\text{рез}} C,$$

откуда

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{80\cdot 10^{-3}\cdot 3140\cdot 10^{-12}}} = 10\,000 \text{ Гц}.$$

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_C}{r}.$$

Ток в цепи определяется по формуле $I = U/z$.

Напряжения на участках цепи $U_L = Ix_L$, $U_C = Ix_C$, $U_a = Ir$

Задаваясь различными частотами и определяя для каждой из них $x_L = 2\pi fL$ и $x_C = 1/2\pi fC$, рассчитаем по приведенным выше формулам нужные для построения кривых значения величин. Результаты расчета сведены в таблицу (см. стр. 150).

Кривые тока и напряжений на реакторе, конденсаторе и активном сопротивлении представлены на рис. 7-18.

f, кГц	0	0,1	0,5	1	5	10	50	100	1000
X_L, кОм	0	0,05	0,25	0,5	2,5	5	25	50	500
X_C, кОм	∞	500	100	50	10	5	1	0,5	0,05
$X_L - X_C$, кОм	$-\infty$	—50	—100	—49,5	—7,5	0	24	49,5	500
Z, кОм	∞	500	100	50,5	12,5	10	26	50,5	500
I, мА	0	0,4	2	4	16	20	7,7	4	0,4
$Z_к$, кОм	10	10	10	10	10,3	11,2	26,9	51	500
U_L, В	0	0,02	0,5	2	40	100	192	200	200
U_C, В	200	200	200	200	160	100	7,7	2	0,02
φ, градусы	—90	—89	—84	—79	—37	0	68	79	89
U_a, В	0	2	20	40	160	200	77	40	4

Если учесть, что рассматриваемые величины определялись в большом диапазоне частот, построение кривых выполнено в логарифмической шкале частот, т. е. по оси абсцисс откладываются в масштабе не сами частоты, а десятичные логарифмы чисел, выражающих частоты. При этом условии частоте 10 Гц соответствует $\lg 10 = 1$; частоте 100 Гц — $\lg 100 = 2$; 1000 Гц — $\lg 1000 = 3$ и т. д. Частоте 5000 Гц соответствует $\lg 5 \cdot 1000 = 3{,}7$.

Из таблицы и кривых видно, что резонансная частота $f_{рез} = 10$ кГц. При этой частоте ток и напряжение на активном сопротивлении достигают максимальных значений, при меньших или больших частотах резко уменьшаются. Поэтому последовательно соединенные реакторы и конденсатор можно рассматривать как простейший фильтр токов и напряжений всех частот, кроме резонансной.

Вопросы и упражнения к задачам 7-20, 7-21

1. Решить задачу 7-20, если замкнуты рубильники P_2, P_4 и P_5.
2. Решить задачу 7-20, если замкнуты рубильники P_1, P_3 и P_5. Определить в этом случае реактивные мощности.

3. В цепи рис. 7-13 индуктивности реакторов 6,35 и 31,8 мГ, емкость конденсатора 265 мкФ. Определить их реактивные сопротивления при частоте 50 Гц. Как изменятся реактивные сопротивления катушек и конденсатора, если частота будет 100, 1000 и 10 000 Гц.

4. Для цепи рис. 7-17 определить, при какой частоте будет резонанс напряжений, если индуктивность реактора 40 мГ, а емкость батареи конденсаторов 16 мкФ. Определить реактивные сопротивления реактора и конденсаторов при резонансной частоте.

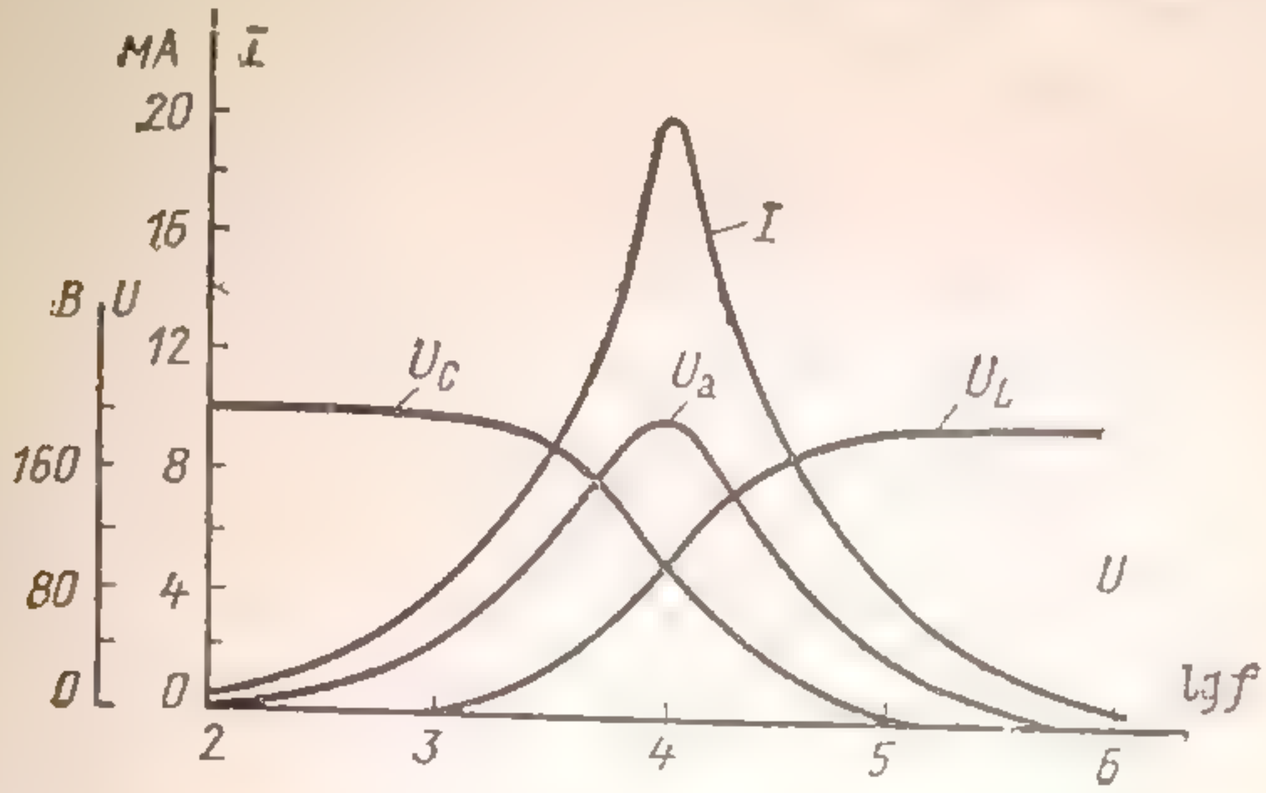


Рис. 7-18. К задаче 7-21.

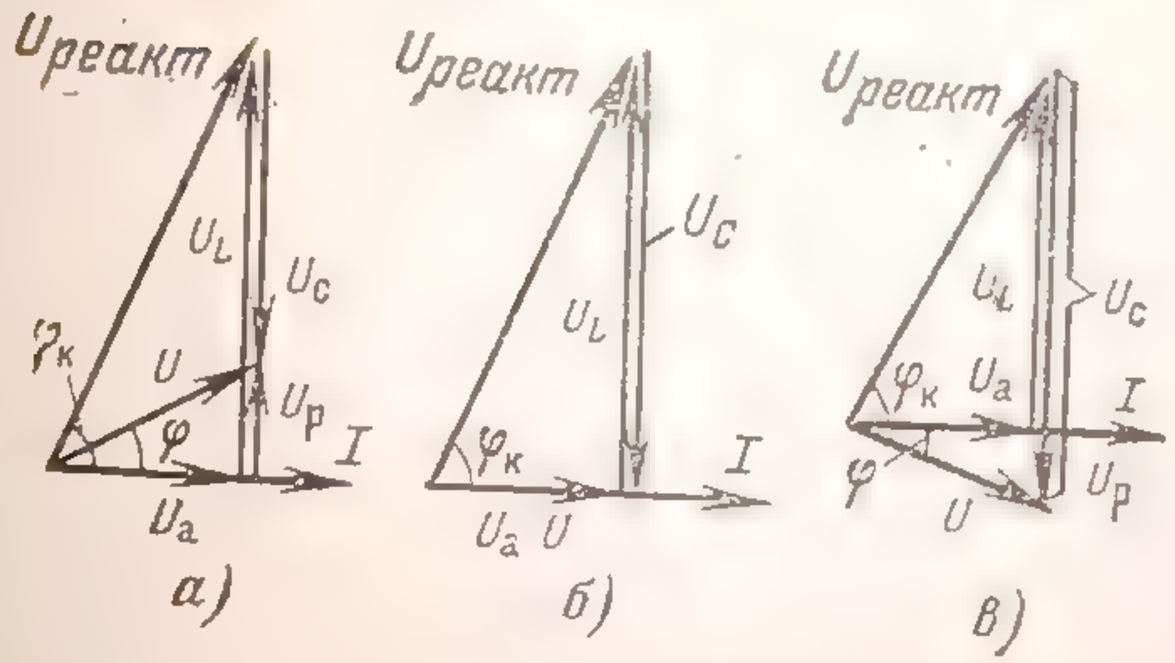


Рис. 7-19. К задаче 7-21.

5. В цепи рис. 7-17 индуктивность реактора можно изменять путем выдвигания стального сердечника. При этом индуктивность принимает значения: а) 255; б) 160; в) 90; г) 50 мГ. Емкость конденсатора постоянна и равна 64 мкФ. Частота сети 50 Гц. Определить, для каких индуктивностей будут иметь место векторные диаграммы, изображенные на рис. 7-19, *а—в**.

6. В цепи рис. 7-17 емкость можно увеличивать путем включения в батарее конденсаторов параллельных групп. При этом емкость батареи принимает значения: а) 10; б) 20; в) 40; г) 60 мкФ. Частота сети 50 Гц. Индуктивность реактора постоянна и равна 255 мГ. Определить, для каких емкостей будут иметь место векторные диаграммы, изображенные на рис. 7-19, *а—в**.

---

* Векторные диаграммы построены в масштабе. $U_{реакт}$ — напряжение на реакторе, содержащем активное сопротивление и индуктивность.

7-22. Последовательно с реактором, обладающим активным сопротивлением $r=6$ Ом и индуктивностью L, включен конденсатор емкостью $C=159$ мкФ (рис. 7-17). Приложенное напряжение $U=36$ В, частота сети $f=50$ Гц. При вставленном стальном сердечнике в реактор индуктивность его $L=127$ мГ, а затем при выдвигании сердечника принимает значения 63,5 и 31,75 мГ. Определить для указанных значений индуктивностей ток в цепи, напряжение на реакторе $U_{реакт}$, напряжение на емкости U_C, активную и реактивную составляющие напряжения реактора U_a и U_L, реактивную составляющую общего напряжения U_p, построить векторную диаграмму.

7-2. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7-23*. Однофазные асинхронные двигатели работают от сети напряжением $U=500$ В и частотой $f=50$ Гц. Двигатели потребляют одинаковую мощность $P=50$ кВт, но имеют разные коэффициенты мощности: 0,8; 0,6 и 0,4.

Условие 1. Определить токи и реактивные мощности двигателей, построить совмещенную векторную диаграмму и дать схему замещения двигателей.

Анализ и решение

Токи двигателей определятся из формулы $I=P/U\cos\varphi$.

Подставляя числовые данные для двигателей, работающих с разными $\cos\varphi$, получаем:

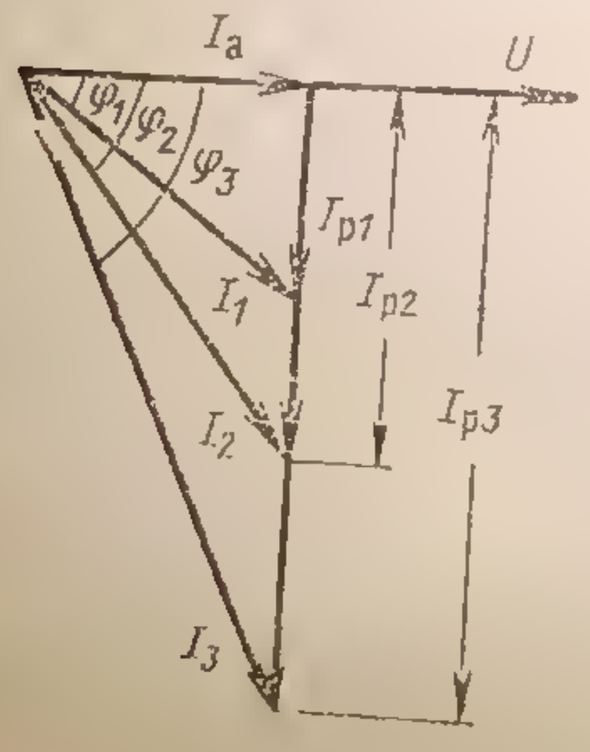


Рис. 7-20. К задаче 7-23.

$$I_1=\frac{P}{U\cos\varphi_1}=\frac{50\,000}{500\cdot 0{,}8}=$$

$$=125\text{ А};\quad I_2=167\text{ А};\quad I_3=250\text{ А}.$$

При неизменных мощности P и напряжении U совмещенная векторная диаграмма будет иметь вид, как показано на рис. 7-20. На диаграмме векторы токов разложены на активную и реактивную составляющие. Мощность двигателя $P=UI\cos\varphi=UI_a$. При неизменной мощности P активная слагающая тока также остается постоянной $I_a=P/U=50\,000/500=100$ А.

Реактивная мощность $Q=I\sin\varphi=UI_p$. Реактивная слагающая тока и реактивная мощность при уменьшении $\cos\varphi$ увеличиваются:

$I_{p1}=I_1\sin\varphi_1=125\cdot 0{,}6=75$ А; $Q_1=UI_{p1}=500\cdot 75=37{,}5$ квар;

$I_{p2}=I_2\sin\varphi_2=167\cdot 0{,}8=134$ А; $Q_2=UI_{p2}=67$ квар;

$I_{p3}=I_3\sin\varphi_3=250\cdot 0{,}915=228$ А; $Q_3=UI_{p3}=114$ квар.

Данной векторной диаграмме соответствует схема замещения (рис. 7-21) с постоянным активным сопротивлением $r=P/I_a^2=$

$=50\,000/10\,000=5$ Ом и индуктивным сопротивлением, зависящим от $\cos\varphi$, $x_1=U/I_{р1}=500/75=6{,}7$ Ом, $x_2=U/I_{р2}=3{,}7$ Ом и аналогично $x_3=2{,}2$ Ом.

Полученные результаты показывают, что с уменьшением $\cos\varphi$ электроприемника при одной и той же потребляемой мощности возрастает ток, увеличивается мощность потерь в проводах, снижается к. п. д.

Условие 2. Генератор переменного тока, от которого питаются двигатели, рассчитан на номинальный ток $I_н=1000$ А и имеет номинальное напряжение $U_н=500$ В. Определить номинальную мощность[1] генератора $S_н$, число двигателей с одинаковым $\cos\varphi$ (0,8; 0,6; 0,4), которые генератор может одновременно обеспечить энергией, активную и реактивную мощности генератора при полной нагрузке. Двигатели потребляют одинаковую мощность $P_{дв}=50$ кВт.

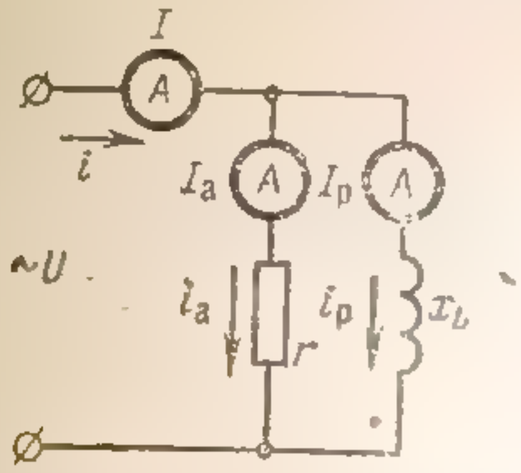


Рис. 7-21. К задачам 7-23, 7-32.

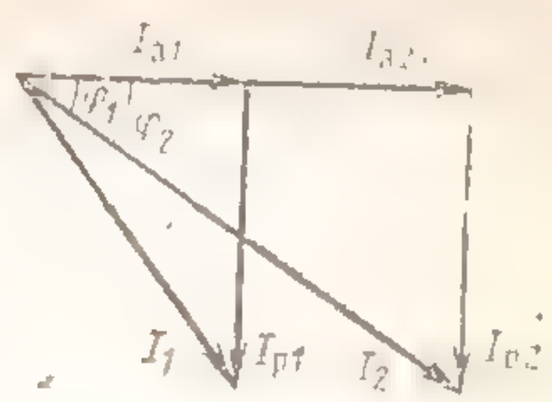


Рис. 7-22. К задаче 7-24.

Анализ и решение

Номинальная мощность генератора $S_н=500\cdot1000=500$ кВ·А. Число двигателей $N=I_н/I_{дв}$, которые генератор может одновременно обеспечить энергией: при $\cos\varphi=0{,}8$ $N_1=1000/125=8$; при $\cos\varphi=0{,}6$ $N_2=1000/167=6$ и при $\cos\varphi=0{,}4$ $N_3=1000/250=4$.

Токи двигателей 125, 167 и 250 А взяты из решения задачи по условию 1. Активная мощность генератора $P=UI_{дв}N\cos\varphi$. При $\cos\varphi=0{,}8$ $P_1=500\cdot125\cdot8\cdot0{,}8=400$ кВт, при $\cos\varphi=0{,}6$ $P_2=500\times\times167\cdot6\cdot0{,}6=300$ кВт; при $\cos\varphi=0{,}4$ $P_3=500\cdot250\cdot4\cdot0{,}4=200$ кВт. Реактивная мощность генератора при тех же условиях $Q=UI_{дв}N\sin\varphi$ $Q_1=500\cdot125\cdot8\cdot0{,}6=300$ квар; $Q_2=500\cdot167\cdot0{,}8=400$ квар и $Q_3=500\cdot250\cdot4\cdot0{,}915=456$ квар.

Анализируя полученные результаты, можно видеть, что при уменьшении $\cos\varphi$ уменьшается число потребителей, которые могут быть одновременно обеспечены энергией от данного генератора без перегрузки его. При этом ухудшается использование генератора, так как при неизменном во всех случаях токе генератора (1000 А) уменьшается его активная мощность и возрастает реактивная мощность. Поэтому низкий $\cos\varphi$ снижает технико-экономические показатели работы энергетической установки.

В последующих задачах показано, какими путями можно повысить коэффициент мощности.

---

[1] Номинальной мощностью генератора называется полная мощность его в киловольт-амперах, которую генератор может развивать при номинальной нагрузке неограниченно долгое время, не перегреваясь выше допустимой температуры.

7-24*. Однофазный двигатель переменного тока работает при напряжении 220 В и при недогрузке потребляет из сети мощность $P_1=3$ кВт при $\cos\varphi=0{,}6$. Определить ток двигателя при данной нагрузке, а также ток и коэффициент мощности двигателя при увеличении механической нагрузки на двигатель вдвое (до номинальной). Подводимую к двигателю мощность, а следовательно, активную слагающую тока считать пропорциональной механической нагрузке двигателя, реактивную мощность, а следовательно, реактивную слагающую тока считать постоянной[1], не зависящей от механической нагрузки двигателя. Построить для обоих случаев совмещенную векторную диаграмму.

Анализ и решение

Подводимая к двигателю мощность $P=IU\cos\varphi=UI_a$. При $P=3$ кВт и $\cos\varphi_1=0{,}6$ $I_1=\dfrac{P_1}{U\cos\varphi_1}=\dfrac{3000}{220\cdot0{,}6}=22{,}7$ А. Активная слагающая тока $I_{a1}=I_1\cos\varphi_1=22{,}7\cdot0{,}6=13{,}7$ А. Реактивная мощность $Q_1=UI_1\sin\varphi_1$, откуда реактивная слагающая тока $I_{p1}=I_1\sin\varphi_1=22{,}7\cdot0{,}8=18{,}2$ А.

Согласно условию при увеличении механической нагрузки вдвое подводимая к двигателю мощность и активная слагающая тока также увеличатся вдвое. Следовательно, $P_2=2P_1=6$ кВт и $I_{a2}=2I_{a1}=27{,}4$ А. Реактивная мощность и реактивная слагающая тока останутся неизменными: $Q_2=4$ квар и $I_{p2}=18{,}2$ А.

Векторная диаграмма для обоих случаев представлена на рис. 7-22.

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_2=\sqrt{I_{a2}^2+I_{p2}^2}=32{,}8\text{ А},\quad \cos\varphi_2=\frac{I_{a2}}{I_2}=\frac{27{,}4}{32{,}8}=0{,}84.$$

Следовательно, одним из способов увеличения коэффициента мощности является нагрузка двигателей на полную мощность. При недогрузке двигателей, особенно при холостом ходе, коэффициент мощности уменьшается.

Вопросы и упражнения к задачам 7-23, 7-24

1. Однофазный генератор с номинальным напряжением $U_н=400$ В и током $I_н=200$ А работает с полной нагрузкой при коэффициенте мощности $\cos\varphi_1=0{,}8$.

Определить активную и реактивную мощности этого генератора. Как изменится его коэффициент мощности, если при той же активной мощности реактивная мощность уменьшится в 2 раза.

2. В условиях задачи 7-24 определить ток и коэффициент мощности двигателя при данной нагрузке и в случаях: а) уменьшения механической нагрузки на двигатель вдвое; в) увеличения механической нагрузки на двигатель втрое.

7-25. В конце двухпроводной линии присоединена нагрузка $P_2=250$ кВт при напряжении $U_2=6000$ В. Определить к. п. д. линии передачи при $\cos\varphi_2=1$; 0,8 и 0,5, если активное сопротивление проводов линии составляет 3 Ом.

---

[1] Реактивная мощность двигателя зависит в основном от сорта применяемой стали в магнитной системе двигателя и от ее габаритов. От механической нагрузки на вал двигателя реактивная мощность мало зависит.

7-26*. Цепь, рис. 7-23, состоит из двух параллельных ветвей с активными и реактивными сопротивлениями $r_1=8$ Ом, $x_1=2$ Ом, $r_2=3$ Ом, $x_2=10$ Ом. Приложенное напряжение $U=65$ В.

В цепи применен выключатель на пять позиций. В нулевой позиции все контакты выключателя, обозначенные на схеме K_1, K_2, K_3 и K_4, разомкнуты. В первой позиции замыкается контакт K_1, во второй позиции контакт K_1 размыкается и замыкается контакт K_2, в третьей позиции контакт K_2 размыкается, замыкается контакт K_3 и на четвертой позиции K_3 размыкается и замыкается контакт K_4.

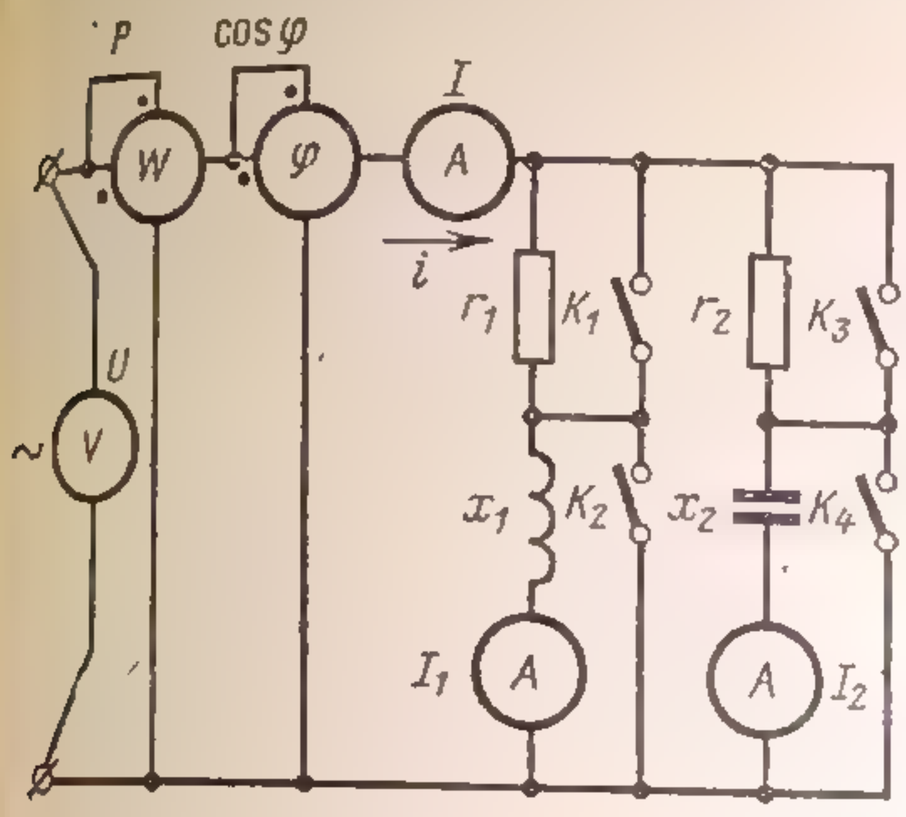


Рис. 7-23. К задачам 7-26, 7-28, 7-29.

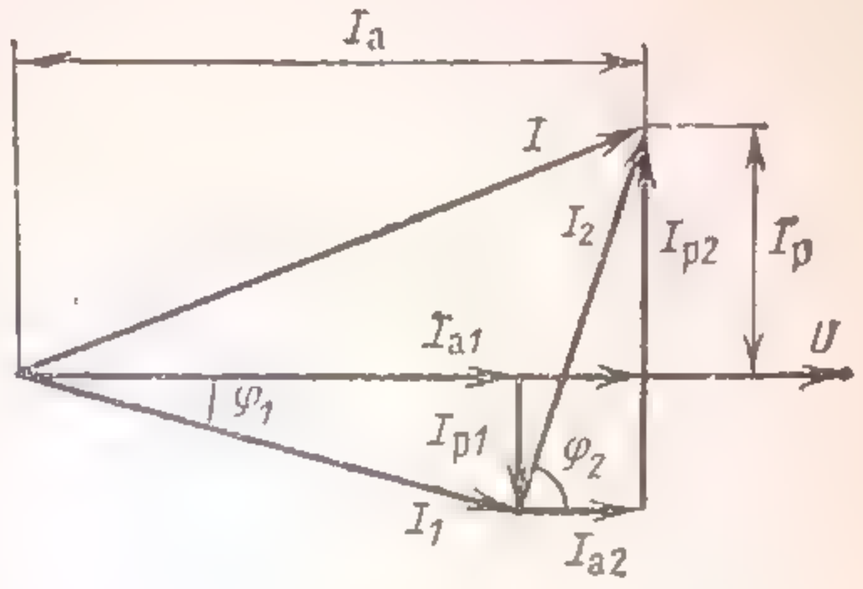


Рис. 7-24. К задаче 7-26.

Условие 1. При положении выключателя в нулевой позиции вычертить векторную диаграмму цепи, пользуясь ею, определить показания всех измерительных приборов и проверить баланс мощностей.

Анализ и решение

Для данного условия (все контакты разомкнуты) обе параллельные ветви содержат активные и реактивные сопротивления. Векторная диаграмма для такой цепи показана на рис. 7-24. По первому закону Кирхгофа для мгновенных значений $i=i_1+i_2$. Вектор тока I (действующее значение) в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме векторов токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях. Вектор напряжения, одинакового для обеих параллельных ветвей, отложен по горизонтали.

Токи в параллельных ветвях определятся из уравнений закона Ома:

$$I_1=\frac{U}{z_1}=\frac{65}{8{,}25}=7{,}9\text{ А},$$

где $z_1=\sqrt{r_1^2+x_1^2}=\sqrt{64+4}=8{,}25$ Ом;

$$\operatorname{tg}\varphi_1=\frac{x_1}{r_1}=\frac{2}{8}=0{,}25,\text{ откуда }\varphi_1=14^\circ,$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{65}{10{,}45} = 6{,}2 \text{ А},$$

где $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{9 + 100} = 10{,}45$ Ом;

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{10}{3} = 3{,}33, \text{ откуда } \varphi_2 = 73°20'.$$

Для определения тока в неразветвленной части цепи разложим векторы токов на активные и реактивные составляющие, как показано на векторной диаграмме.

Активная составляющая тока в первой параллельной ветви

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 7{,}9 \cos 14° = 7{,}9 \cdot 0{,}97 = 7{,}66 \text{ А}.$$

Реактивная слагающая тока в первой параллельной ветви

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = 7{,}9 \sin 14° = 7{,}9 \cdot 0{,}242 = 1{,}91 \text{ А}.$$

Активная составляющая тока во второй параллельной ветви

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 6{,}2 \cos 73°20' = 6{,}2 \cdot 0{,}287 = 1{,}78 \text{ А}.$$

Реактивная слагающая тока во второй параллельной ветви

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 6{,}2 \sin 73°20' = 6{,}2 \cdot 0{,}958 = 5{,}93 \text{ А}.$$

Как видно из векторной диаграммы, активная слагающая тока в неразветвленной части цепи

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 7{,}66 + 1{,}78 = 9{,}44 \text{ А}.$$

Реактивная слагающая тока в неразветвленной части цепи

$$I_p = I_{p2} - I_{p1} = 5{,}93 - 1{,}91 = 4{,}02 \text{ А}.$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{9{,}44^2 + 4{,}02^2} = 10{,}3 \text{ А}.$$

Следует обратить внимание на то, что показание амперметра в неразветвленной части цепи не будет равно сумме показаний амперметров в параллельных ветвях, как это имеет место в цепи постоянного тока. Здесь токи не совпадают по фазе, и сложение их нужно производить геометрически (векторно). Из векторной диаграммы (рис. 7-24,г) можно также определить, каким будет показание фазометра:

$$\cos \varphi = I_a / I = 9{,}44 / 10{,}3 = 0{,}92, \text{ откуда } \varphi = 22°.$$

Теперь можно определить мощность, расходуемую в цепи (показание ваттметра),

$$P = UI \cos \varphi = 65 \cdot 10{,}3 \cdot 0{,}92 = 615 \text{ Вт}.$$

Мощность в первой параллельной ветви

$$P_1 = I_1^2 r_1 = U I_1 \cos \varphi_1 = 500 \text{ Вт}.$$

Мощность во второй параллельной ветви

$$P_2 = I_2^2 r_2 = U I_2 \cos \varphi_2 = 115 \text{ Вт}.$$

Проверка баланса мощностей

$$P = P_1 + P_2;\ 615 = 500 + 115\ \text{Вт}.$$

Условие 2. При разомкнутых контактах выключателя определить, как нужно изменить сопротивления r_2 и x_2, чтобы в цепи получился резонанс токов при неизменном угле сдвига фаз φ_2. Определить также для этого случая ток в неразветвленной части цепи.

Анализ и решение

Условием резонанса токов является равенство реактивных слагающих токов в параллельных ветвях, содержащих индуктивности и емкости. Векторная диаграмма для этого случая представлена на

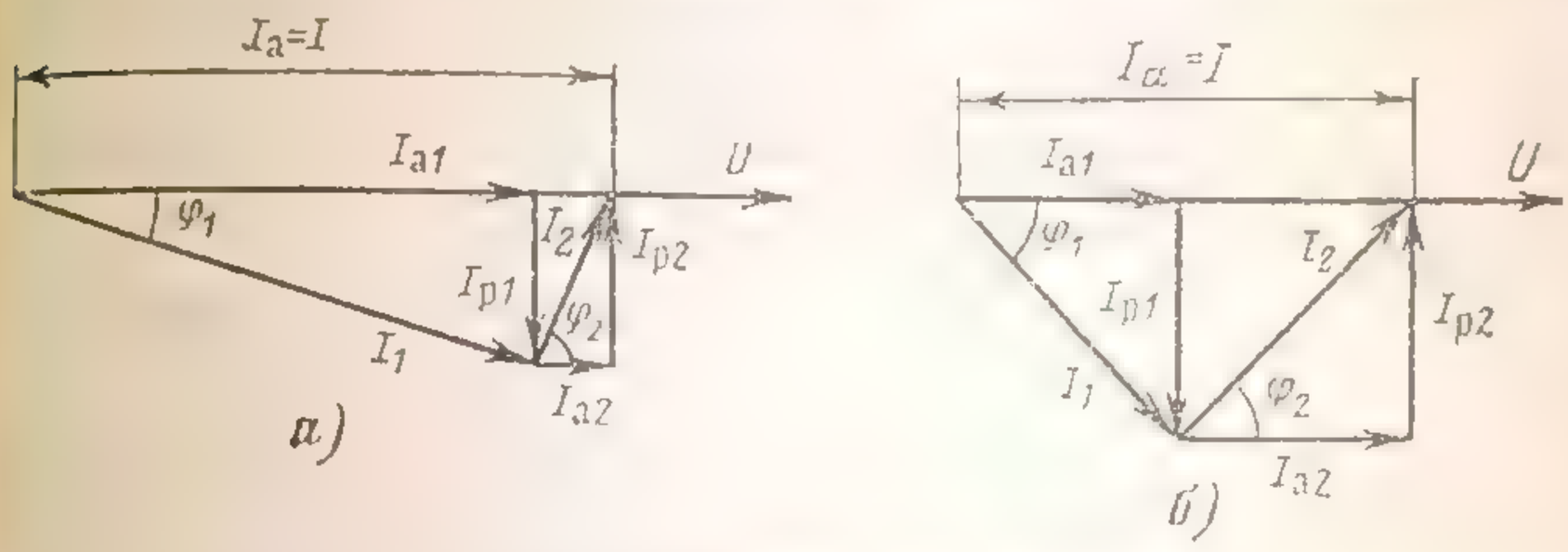


Рис. 7-25. К задаче 7-26, 7-29.

рис. 7-25, *а*. Углы сдвига фаз φ_1 и φ_2, а также токи I_1, I_{a1}, I_{p1} определены в решении задачи по условию 1. Так как $I_{p2} = I_{p1} = 1{,}91$ А, то

$$I_2 = \frac{I_{p2}}{\sin\varphi_2} = \frac{1{,}91}{\sin 73°20'} = \frac{1{,}91}{0{,}958} = 2\ \text{А}.$$

Следовательно, $z_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{65}{2} = 32{,}5$ Ом, $r_2 = z_2 \cos\varphi_2 = 32{,}5 \times 0{,}287 = 9{,}35$ Ом и $x_2 = z_2 \sin\varphi_2 = 32{,}5 \cdot 0{,}958 = 31$ Ом.

Ток в неразветвленной части цепи равен сумме активных слагающих токов в параллельных ветвях:

$$I = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos\varphi_1 + I_2 \cos\varphi_2 = 7{,}66 + 0{,}575 = 8{,}24\ \text{А}.$$

7-27*. Электроприемник, обладающий активным сопротивлением и индуктивностью, получает питание от сети напряжением 220 В при частоте 50 Гц. Для повышения коэффициента мощности параллельно с электроприемником может быть включен конденсатор емкостью C (рис. 7-26). При отключенной емкости показания приборов следующие:

$$I_1 = 10\ \text{А},\ \cos\varphi_1 = 0{,}68\ (\varphi_1 = 46°).$$

Условие 1. При включенной емкости $I = 7{,}5$ А $\cos\varphi = 0{,}91$ ($\varphi = 24°30'$).

Начертить векторную диаграмму и, пользуясь ею, определить ток емкости и емкость конденсаторов. Определить также активную

и полную мощности цепи при отключенных и включенных конденсаторах, реактивную мощность электроприемника, конденсаторов и всей цепи.

Анализ и решение

Данные условиям задачи могут удовлетворять два решения: одно при отстающем по фазе токе в неразветвленной части цепи, другое — при опережающем токе. Векторные диаграммы на рис. 7-27, *а* и *б* поясняют сказанное.

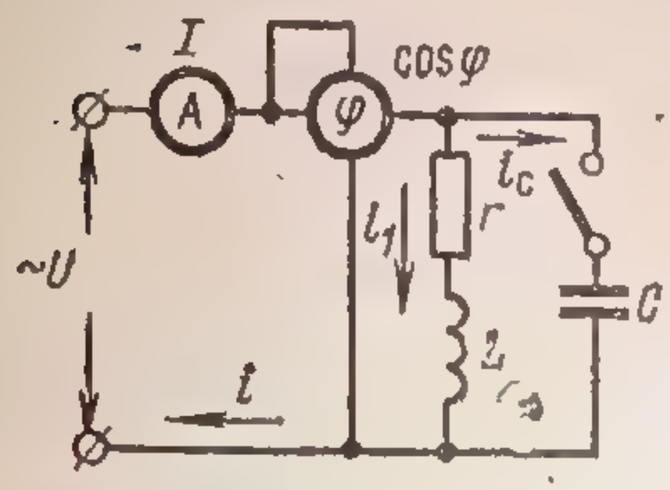


Рис. 7-26. К задачам 7-27, 7-28, 7-32.

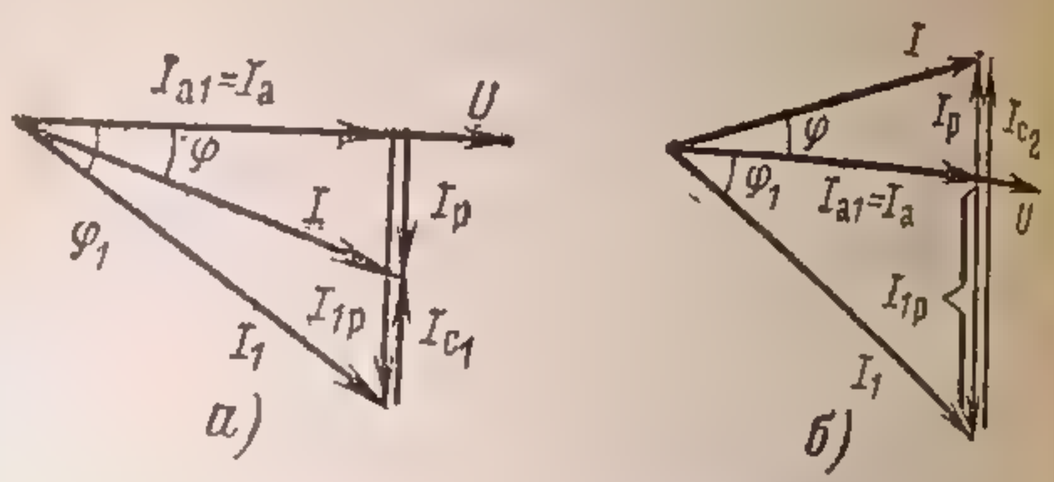


Рис. 7-27. К задаче 7-27.

На векторных диаграммах ток электроприемника I_1 и ток в неразветвленной части цепи I разложены на составляющие: активные I_{1a}, I_a и соответственно реактивные I_{1p}, I_p. По данным задачи составляющие токов определятся:

$$I_{1a} = I_a = I_1 \cos \varphi_1 = I \cos \varphi = 6{,}8 \text{ А};$$

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = 10 \cdot 0{,}72 = 7{,}2 \text{ А}; \quad I_p = I \sin \varphi = 7{,}5 \cdot 0{,}41 = 3{,}07 \text{ А}.$$

В случае отстающего тока в неразветвленной части цепи (рис. 7-27, *а*) ток емкости

$$I_{C1} = I_{1p} - I_p = 7{,}2 - 3{,}07 = 4{,}13 \text{ А}.$$

Реактивное сопротивление емкости

$$x_{C1} = \frac{U}{I_{C1}} = \frac{220}{4{,}13} = 53{,}5 \text{ Ом}.$$

Отсюда емкость конденсаторов

$$C = \frac{10^6}{\omega x_{C1}} = \frac{10^6}{2\pi f x_{C1}} = \frac{10^6}{314 \cdot 53{,}5} = 60 \text{ мкФ}.$$

Так как потери в конденсаторах ничтожны и практически они не потребляют энергии, средняя или активная мощность не зависит от того, включены они или нет. Поэтому мощность потребителя будет равна мощности всей цепи при включенных конденсаторах

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = IU \cos \varphi = U I_a = 220 \cdot 6{,}8 = 1500 \text{ Вт}.$$

Полные мощности будут различаться:

для потребителя $S_1 = UI_1 = 220 \cdot 10 = 2200$ В·А;

для всей цепи $S = UI = 220 \cdot 7{,}5 = 1650$ В·А.

Теперь определим реактивные мощности. Реактивная мощность потребителя

$$Q_1 = UI_{1p} = 220 \cdot 7{,}2 = 1580 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Реактивная мощность конденсаторов

$$Q_{C1} = UI_{C1} = 220 \cdot 4{,}13 = 910 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Реактивная мощность всей цепи

$$Q = UI_p = 220 \cdot 3{,}07 = 670 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

При опережающем токе в неразветвленной части цепи (рис. 7-27, *б*) ток емкости

$$I_{C2} = I_{1p} + I_p = 7{,}2 + 3{,}07 = 10{,}27 \text{ А}.$$

Реактивное сопротивление емкости

$$x_{C2} = \frac{U}{I_{C2}} = \frac{200}{10{,}27} = 21{,}4 \text{ Ом}.$$

Отсюда емкость конденсаторов

$$C_2 = \frac{10^6}{\omega x_{C2}} = \frac{10^6}{314 \cdot 21{,}4} = 149 \text{ мкФ}.$$

Реактивная мощность конденсаторов

$$Q_{C2} = UI_{C2} = 220 \cdot 10{,}27 = 2250 \text{ вар}.$$

Все остальные величины останутся без изменения.

Условие 2. Определить, какими должны быть ток и емкость конденсаторов, чтобы получился резонанс токов. Начертить для этого случая векторную диаграмму и определить ток в неразветвленной части цепи, активную и полную мощности цепи, реактивную мощность конденсаторов, потребителя и всей цепи.

Анализ и решение

Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 7-28, *а*. При резонансе токов ток емкости I_C (он же на векторной диаграмме I_2) равен реактивной слагающей тока электроприемника I_{1p}. Тогда ток в неразветвленной части цепи I будет наименьшим и равен активной слагающей тока I_{1a}. Коэффициент мощности установки $\cos\varphi = 1$.

Следовательно, $I_{C\,рез} = 7{,}2$ А; $I = 6{,}8$ А (см. решение задачи по условию 1).

Реактивное сопротивление емкости

$$x_{C рез} = \frac{U}{I_{C рез}} = \frac{220}{7{,}2} = 30{,}5 \text{ Ом}.$$

Отсюда емкость конденсаторов

$$C_{рез} = \frac{10^6}{\omega x_{C\,рез}} = \frac{10^6}{2\pi f x_{C рез}} = \frac{10^6}{314 \cdot 30{,}5} = 105 \text{ мкФ}.$$

Активная мощность будет равна полной мощности цепи

$$S = P = UI\cos\varphi = UI = 1500 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность конденсаторов равна реактивной мощности электроприемника

$$Q_C = Q_1 = UI_{C\text{рез}} = UI_{1\text{р}} = 220 \cdot 7{,}2 = 1580 \text{ вар}.$$

Реактивная мощность всей цепи $Q = UI_\text{р} = 0$, так как $I_\text{р} = I \sin \varphi = 0$.

Анализируя результаты решения задачи, можно видеть, что включение конденсаторов параллельно с основным электроприемником, обладающим активным сопротивлением и индуктивностью, практически не вызывает изменения активной мощности, но разгружает сеть от реактивной мощности. Таким образом, осуществляется

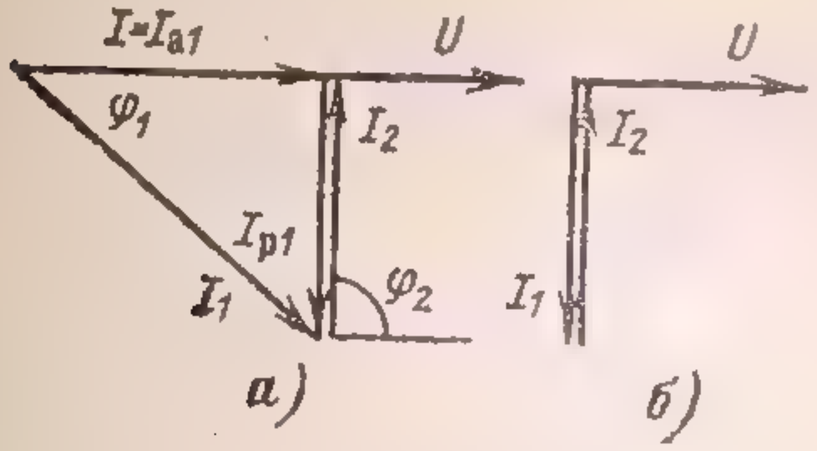


Рис. 7-28. К задачам 7-27, 7-38.

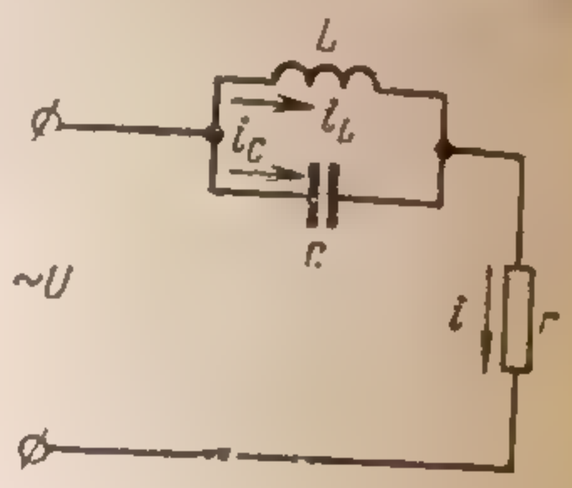


Рис. 7-29. К задаче 7-28.

компенсация реактивной мощности. Подбором емкости конденсаторов можно cos φ установки увеличить до единицы (резонанс токов).

При чрезмерно большой емкости происходит «перекомпенсация» (рис. 7-27, *б*), ток снова будет увеличиваться и cos φ уменьшаться.

7-28*. В цепи переменного тока (рис. 7-29) последовательно с активным сопротивлением $r = 100$ Ом включен участок с параллельно соединенными индуктивностью $L = 0{,}1$ Г и емкостью $C = 40$ мкФ. Напряжение на выводах цепи 120 В. Определить частоту, при которой в контуре реактор — конденсатор возникает резонанс токов. Для разных значений частоты от $f = 0$ (постоянный ток) до $f = 2f_\text{рез}$ (двойная частота резонанса) вычислить токи, напряжения на всех участках цепи и угол сдвига фаз между током в неразветвленной части цепи и напряжением. По найденным значениям величин построить соответствующие кривые. При частотах $f < f_\text{рез}$, $f = f_\text{рез}$ и $f > f_\text{рез}$ показать векторные диаграммы. Определить, какой режим установится в контуре при бесконечном возрастании частоты.

Найти предельное значение тока, а также угла сдвига фаз между током и напряжением на выводах цепи при $f \to \infty$

Анализ и решение

Контур, состоящий из параллельно соединенных индуктивности и емкости, можно заменить эквивалентным реактивным сопротивлением x индуктивности или емкости в зависимости от того, что преобладает x_C или x_L. Действительно, при напряжении на выводах контура $U_к$ ток реактора $I_L = U_к / x_L$, ток конденсатора $I_C = U_к / x_C$. Векторная диаграмма токов и напряжения контура представлена на рис. 7-30, *а* при $x_L > x_C$ и на рис. 7-30, *б* при $x_L < x_C$. При $x_L = x_C$ (резонанс токов) векторная диаграмма была показана на рис. 7-28, *б*.

Из диаграммы рис. 7-30, *а* видно, что при $x_L > x_C$ $I = I_C - I_L$.

Заменяя $I_C = U_к/x_C$ и $I_L = U_к/x_L$, получаем:

$$I = U_к\left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_L}\right) =$$

$$= U_к \frac{x_L - x_C}{x_L x_C} = \frac{U_к}{x},$$

где $x = \dfrac{x_L x_C}{x_L - x_C}$

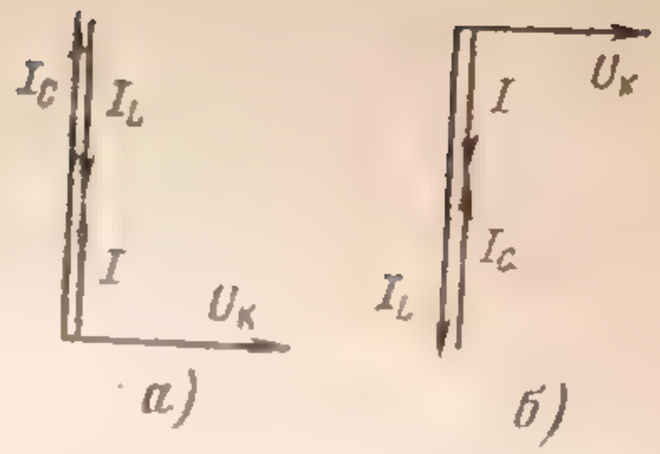


Рис. 7-30. К задаче 7-28

— эквивалентное реактивное сопротивление емкости, так как ток I в неразветвленной части цепи опережает по фазе напряжение $U_к$ на 90°.

При $x_L < x_C$

$$I = I_L - I_C = U_к\left(\frac{1}{x_L} - \frac{1}{x_C}\right) = U_к \frac{x_C - x_L}{x_L x_C} = \frac{U_к}{x},$$

где $x = \dfrac{x_L x_C}{x_C - x_L}$ — эквивалентное сопротивление индуктивности, так как ток I в неразветвленной части цепи отстает по фазе от напряжения $U_к$ на 90°.

При $x_L = x_C$ (резонанс токов) эквивалентное сопротивление контура

$$x = \frac{x_L x_C}{x_L - x_C} = \infty$$

и ток

$$I = I_L - I_C = \frac{U_к}{x} = 0.$$

С учетом последовательно соединенного активного сопротивления получим: полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2}$, ток в неразветвленной части цепи $I = U/z$, напряжение на выводах контура $U_к = Ix$, напряжение на активном сопротивлении $U_a = Ir$. Угол сдвига фаз между током в неразветвленной части цепи и напряжением определится из соотношения $\operatorname{tg}\varphi = x/r$.

При резонансах токов $x_C = x_L$ или $1/\omega_р C = \omega_р L$, откуда угловая частота при резонансе

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}1 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}} = 500 \frac{рад}{с}.$$

Следовательно, резонансная частота

$$f_{рез} = \frac{\omega_р}{2\pi} = \frac{500}{2\pi} = 80 \text{ Гц}.$$

Реактивные сопротивления индуктивности и емкости при резонансе токов получатся

$$x_L = \omega_{рез} L = 500 \cdot 0{,}1 = 50 \text{ Ом};$$

$$x_C = \frac{1}{\omega_{рез} C} = \frac{1}{500 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление при резонансе $x = \infty$. Следовательно, полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \infty$. Тогда ток в цепи $I = U/z = 120/\infty = 0$ и падение напряжения в активном сопротивлении Ir также равно нулю. Поэтому напряжение на выводах контура будет равно напряжению на выводах цепи $U = 120$ В и токи в ветвях контура

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{120}{50} = 2{,}4 \text{ А и } I_C = \frac{U}{x_C} = 2{,}4 \text{ А}.$$

Задаваясь различными угловыми частотами и произведя по вышеприведенным формулам расчеты, получаем требуемые данные, которые сведены в таблицу.

ω, рад/с	x_L, Ом	x_C, Ом	x, Ом	z, Ом	I, А	$U_к$, В	I_L, А	I_C, А	$U_а$, В	tg φ	φ
0	0	∞	0	120	1,2	0	1,2	0	120	0	0
125	12,5	200	13,4	101	1,19	15,9	1,27	0,08	119	0,133	7°30′
250	25	100	33	105	1,14	38	1,52	0,4	114	0,333	18°20′
375	37,5	67	85,6	131,5	0,9	78	2,08	1,17	91	0,856	40°30′
500	50	50	∞	∞	0	120	2,4	2,4	0	∞	$\pm 90°$
625	62,5	40	11	149	0,8	89	1,43	2,23	80,5	—1,11	—48°
750	75	33	60	116,5	1	62	0,82	1,85	103	—0,6	—31°
875	87,5	29	42,5	109	1,1	47	0,54	1,64	110	—0,425	—23°
1000	100	25	33	105	1,14	38	0,4	1,52	114	—0,333	—18°30′
∞	∞	0	0	100	1,2	0	0	1,2	120	0	0

При частоте, равной нулю (постоянный ток), сопротивление конденсатора $x_C = \infty$ (ветвь разомкнута), а реактор имеет сопротивление $x_L = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через реактор и в цепи имеется одно активное сопротивление.

При частоте, равной бесконечности, $x_L = \infty$ (ветвь разомкнута), а конденсатор имеет сопротивление $x_C = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через конденсатор и в цепи имеется также одно активное сопротивление.

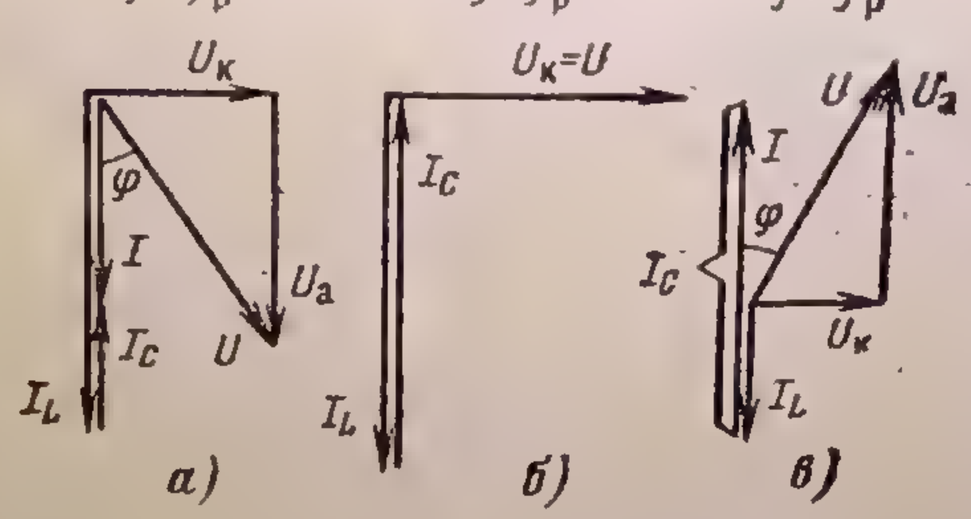


Рис. 7-31. К задаче 7-28.

Векторные диаграммы при частотах а) $f < f_{рез}$, б) $f = f_{рез}$ и в) $f > f_{рез}$ показаны на рис. 7-31.

Реактивные сопротивления индуктивности и емкости при резонансе токов получатся

$$x_L = \omega_{рез} L = 500 \cdot 0{,}1 = 50 \text{ Ом};$$

$$x_C = \frac{1}{\omega_{рез} C} = \frac{1}{500 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление при резонансе $x = \infty$. Следовательно, полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \infty$. Тогда ток в цепи $I = U/z = 120/\infty = 0$ и падение напряжения в активном сопротивлении Ir также равно нулю. Поэтому напряжение на выводах контура будет равно напряжению на выводах цепи $U = 120$ В и токи в ветвях контура

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{120}{50} = 2{,}4 \text{ А и } I_C = \frac{U}{x_C} = 2{,}4 \text{ А}.$$

Задаваясь различными угловыми частотами и произведя по вышеприведенным формулам расчеты, получаем требуемые данные, которые сведены в таблицу.

ω, рад/с	x_L, Ом	x_C, Ом	x, Ом	z, Ом	I, А	$U_к$, В	I_L, А	I_C, А	U_a, В	tg φ	φ
0	0	∞	0	100	1,2	0	1,2	0	120	0	0
125	12,5	200	13,4	101	1,19	15,9	1,27	0,08	119	0,133	7°30′
250	25	100	33	105	1,14	38	1,52	0,4	114	0,333	18°20′
375	37,5	67	85,6	131,5	0,9	78	2,08	1,17	91	0,856	40°30′
500	50	50	∞	∞	0	120	2,4	2,4	0	∞	$\pm$90°
625	62,5	40	11	149	0,8	89	1,43	2,23	80,5	—1,11	—48°
750	75	33	60	116,5	1	62	0,82	1,85	103	—0,6	—31°
875	87,5	29	42,5	109	1,1	47	0,54	1,64	110	—0,425	—23°
1000	100	25	33	105	1,14	38	0,4	1,52	114	—0,333	—18°30′
∞	∞	0	0	100	1,2	0	0	1,2	120	0	0

При частоте, равной нулю (постоянный ток), сопротивление конденсатора $x_C = \infty$ (ветвь разомкнута), а реактор имеет сопротивление $x_L = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через реактор и в цепи имеется одно активное сопротивление.

При частоте, равной бесконечности, $x_L = \infty$ (ветвь разомкнута), а конденсатор имеет сопротивление $x_C = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через конденсатор и в цепи имеется также одно активное сопротивление.

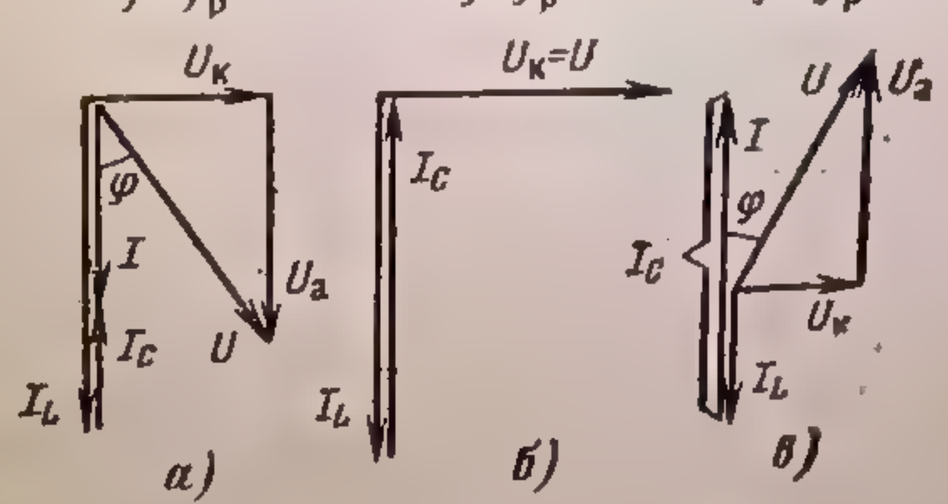


Рис. 7-31. К задаче 7-28.

Векторные диаграммы при частотах а) $f<f_{рез}$, б) $f=f_{рез}$ и в) $f>f_{рез}$ показаны на рис. 7-31.

Реактивные сопротивления индуктивности и емкости при резонансе токов получатся

$$x_L = \omega_{рез} L = 500 \cdot 0{,}1 = 50 \text{ Ом};$$

$$x_C = \frac{1}{\omega_{рез} C} = \frac{1}{500 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление при резонансе $x = \infty$. Следовательно, полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \infty$. Тогда ток в цепи $I = U/z = 120/\infty = 0$ и падение напряжения в активном сопротивлении Ir также равно нулю. Поэтому напряжение на выводах контура будет равно напряжению на выводах цепи $U = 120$ В и токи в ветвях контура

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{120}{50} = 2{,}4 \text{ А и } I_C = \frac{U}{x_C} = 2{,}4 \text{ А}.$$

Задаваясь различными угловыми частотами и произведя по вышеприведенным формулам расчеты, получаем требуемые данные, которые сведены в таблицу.

ω, рад/с	x_L, Ом	x_C, Ом	x, Ом	z, Ом	I, А	$U_к$, В	I_L, А	I_C, А	$U_а$, В	tg φ	φ
0	0	∞	0	100	1,2	0	1,2	0	120	0	0
125	12,5	200	13,4	101	1,19	15,9	1,27	0,08	119	0,133	7°30′
250	25	100	33	105	1,14	38	1,52	0,4	114	0,333	18°20′
375	37,5	67	85,6	131,5	0,9	78	2,08	1,17	91	0,856	40°30′
500	50	50	∞	∞	0	120	2,4	2,4	0	∞	$\pm$90°
625	62,5	40	11	149	0,8	89	1,43	2,23	80,5	—1,11	—48°
750	75	33	60	116,5	1	62	0,82	1,85	103	—0,6	—31°
875	87,5	29	42,5	109	1,1	47	0,54	1,64	110	—0,425	—23°
1000	100	25	33	105	1,14	38	0,4	1,52	114	—0,333	—18°30′
∞	∞	0	0	100	1,2	0	0	1,2	120	0	0

При частоте, равной нулю (постоянный ток), сопротивление конденсатора $x_C = \infty$ (ветвь разомкнута), а реактор имеет сопротивление $x_L = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через реактор и в цепи имеется одно активное сопротивление.

При частоте, равной бесконечности, $x_L = \infty$ (ветвь разомкнута), а конденсатор имеет сопротивление $x_C = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через конденсатор и в цепи имеется также одно активное сопротивление.

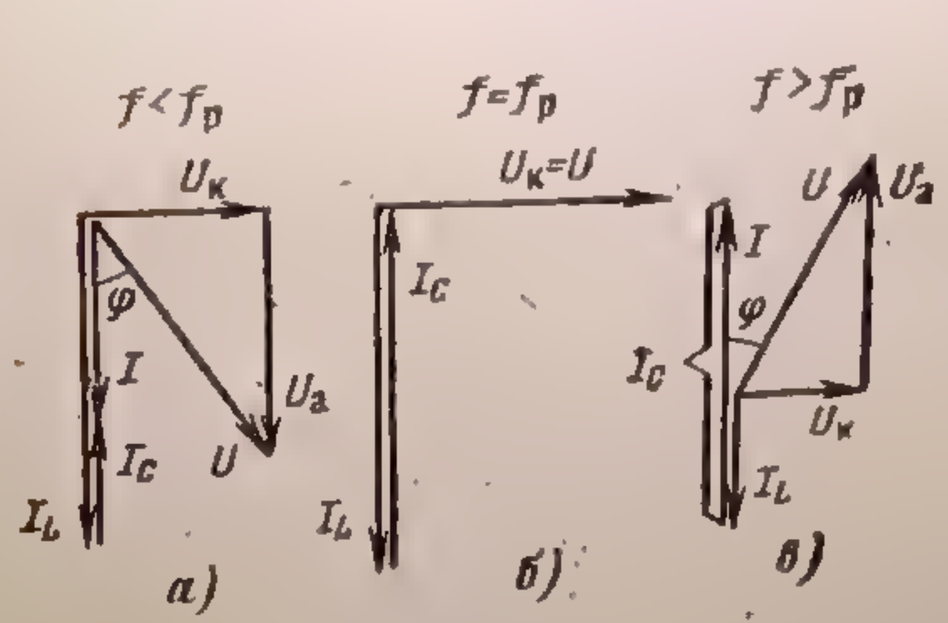


Рис. 7-31. К задаче 7-28.

Векторные диаграммы при частотах а) $f < f_{рез}$, б) $f = f_{рез}$ и в) $f > f_{рез}$ показаны на рис. 7-31.

Реактивные сопротивления индуктивности и емкости при резонансе токов получатся

$$x_L = \omega_{рез} L = 500 \cdot 0{,}1 = 50 \text{ Ом};$$

$$x_C = \frac{1}{\omega_{рез} C} = \frac{1}{500 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление при резонансе $x = \infty$. Следовательно, полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \infty$. Тогда ток в цепи $I = U/z = 120/\infty = 0$ и падение напряжения в активном сопротивлении Ir также равно нулю. Поэтому напряжение на выводах контура будет равно напряжению на выводах цепи $U = 120$ В и токи в ветвях контура

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{120}{50} = 2{,}4 \text{ А и } I_C = \frac{U}{x_C} = 2{,}4 \text{ А}.$$

Задаваясь различными угловыми частотами и произведя по вышеприведенным формулам расчеты, получаем требуемые данные, которые сведены в таблицу.

ω, рад/с	x_L, Ом	x_C, Ом	x, Ом	z, Ом	I, А	$U_к$, В	I_L, А	I_C, А	$U_а$, В	tg φ	φ
0	0	∞	0	100	1,2	0	1,2	0	120	0	0
125	12,5	200	13,4	101	1,19	15,9	1,27	0,08	119	0,133	7°30′
250	25	100	33	105	1,14	38	1,52	0,4	114	0,333	18°20′
375	37,5	67	85,6	131,5	0,9	78	2,08	1,17	91	0,856	40°30′
500	50	50	∞	∞	0	120	2,4	2,4	0	∞	$\pm$90°
625	62,5	40	11	149	0,8	89	1,43	2,23	80,5	—1,11	—48°
750	75	33	60	116,5	1	62	0,82	1,85	103	—0,6	—31°
875	87,5	29	42,5	109	1,1	47	0,54	1,64	110	—0,425	—23°
1000	100	25	33	105	1,14	38	0,4	1,52	114	—0,333	—18°30′
∞	∞	0	0	100	1,2	0	0	1,2	120	0	0

При частоте, равной нулю (постоянный ток), сопротивление конденсатора $x_C = \infty$ (ветвь разомкнута), а реактор имеет сопротивление $x_L = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через реактор и в цепи имеется одно активное сопротивление.

При частоте, равной бесконечности, $x_L = \infty$ (ветвь разомкнута), а конденсатор имеет сопротивление $x_C = 0$. Поэтому контур оказывается как бы замкнутым накоротко через конденсатор и в цепи имеется также одно активное сопротивление.

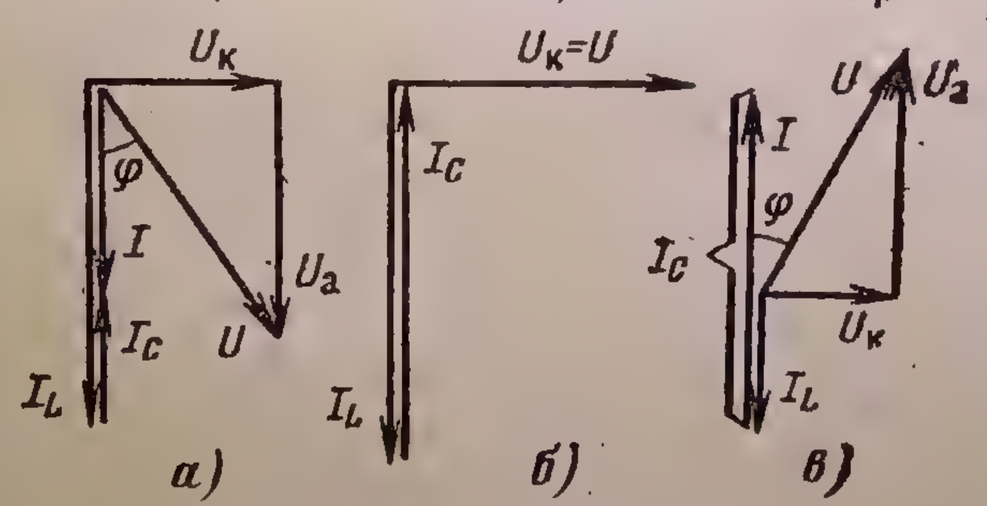


Рис. 7-31. К задаче 7-28.

Векторные диаграммы при частотах а) $f < f_{рез}$, б) $f = f_{рез}$ и в) $f > f_{рез}$ показаны на рис. 7-31.

Из векторных диаграмм видно, что при $f<f_{рез}$ ток I отстает по фазе от напряжения. С увеличением частоты угол φ увеличивается от нуля до 90°. При $f>f_{рез}$ знак угла φ изменяется на обратный, так как ток становится опережающим. Изменение знака угла φ происходит при переходе через резонанс при $\varphi=90°$. Поэтому при резонансе токов угол сдвига фаз изменяется скачком с +90° на —90° (опрокидывание фазы) и при дальнейшем увеличении частоты уменьшается, стремясь к нулю.

Кривые тока I в неразветвленной части цепи и угла сдвига фаз φ в зависимости от угловой частоты представлены на рис. 7-32.

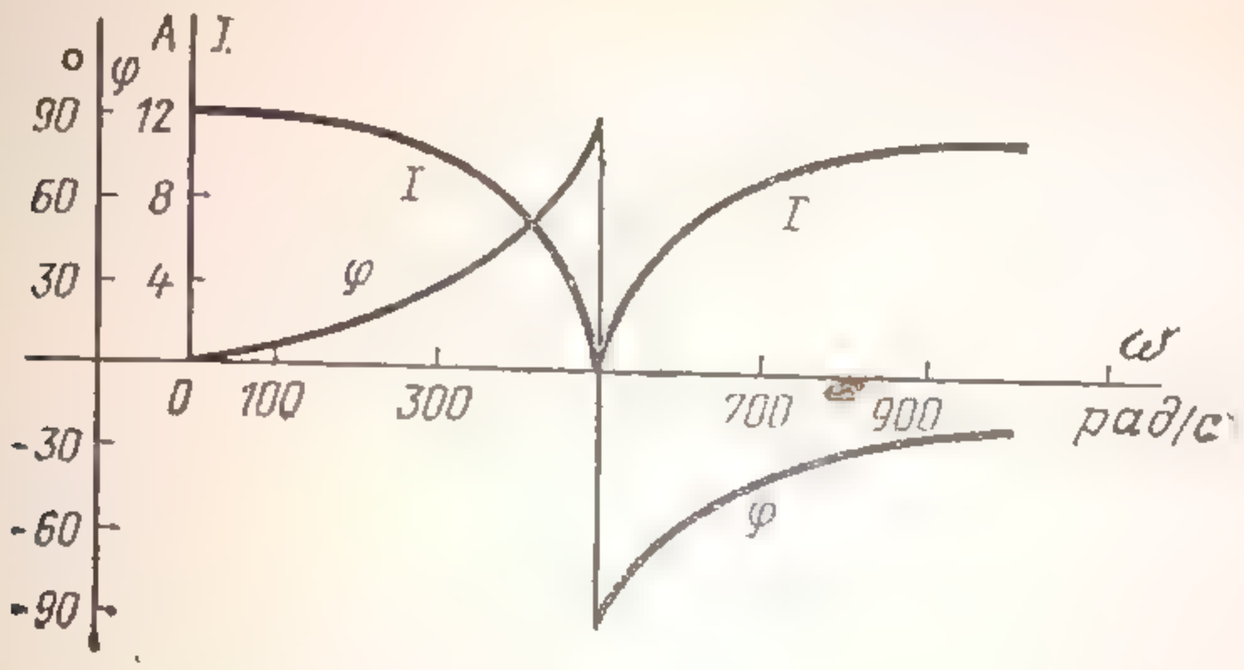


Рис. 7-32. К задаче 7-28.

Из рассмотрения кривой тока следует, что в широком диапазоне частот в неразветвленной части цепи имеет место незначительное уменьшение тока (0,9—1,2 А), затем вблизи резонансной частоты ток резко уменьшается и при резонансе токов равен нулю. При заданной индуктивности и емкости резонансная частота определяется из выражения $f_{рез}=1/2\pi\sqrt{LC}$. Поэтому всякий контур, состоящий из индуктивности и емкости и имеющий, следовательно, определенную резонансную частоту, будет оказывать току при этой частоте бесконечно большое сопротивление и является своего рода фильтром, пропускающим в то же время токи других частот.

Рассматриваемый контур называется колебательным контуром, так как в нем происходит обмен энергией между индуктивностью и емкостью. Конденсатор и реактор поочередно работают в режимах генератора и потребителя энергии. При резонансной частоте реактивные мощности реактора и конденсатора равны $Q_L=U_к I_L$ и $Q_C=U_к I_C$, а реактивная мощность всей цепи равна нулю $Q=U_к I$. При других частотах $Q_L>Q_C$ или $Q_L<Q_C$, а недостаток реактивной мощности реактора или конденсатора покрывается за счет реактивной мощности источника, т. е. $Q=Q_L-Q_C=U_к I_L-U_к I_C=U_к I$.

Вопросы и упражнения к задачам 7-26—7-28

1. Для цепи рис. 7-23 $r_1=r_2=8$ Ом и при некоторой частоте $x_1=4$ Ом, $x_2=16$ Ом. Определить, будет ли иметь место резонанс токов при заданных x_1 и x_2, при увеличении частоты в n раз, при уменьшении частоты в n раз.

2. Для цепи рис. 7-23 $r_1=r_2=8$ Ом и при некоторой частоте $x_1=x_2=6$ Ом. Определить, будет ли иметь место резонанс токов при заданных x_1 и x_2 и при увеличении или уменьшении частоты в n раз.

3. Параллельно с потребителем, обладающим активным сопротивлением $r=4$ Ом и реактивным $x_L=3$ Ом, включены конденсаторы (рис. 7-26). Определить реактивное сопротивление емкости конденсаторов, при котором $\cos\varphi$ установки увеличится до единицы.

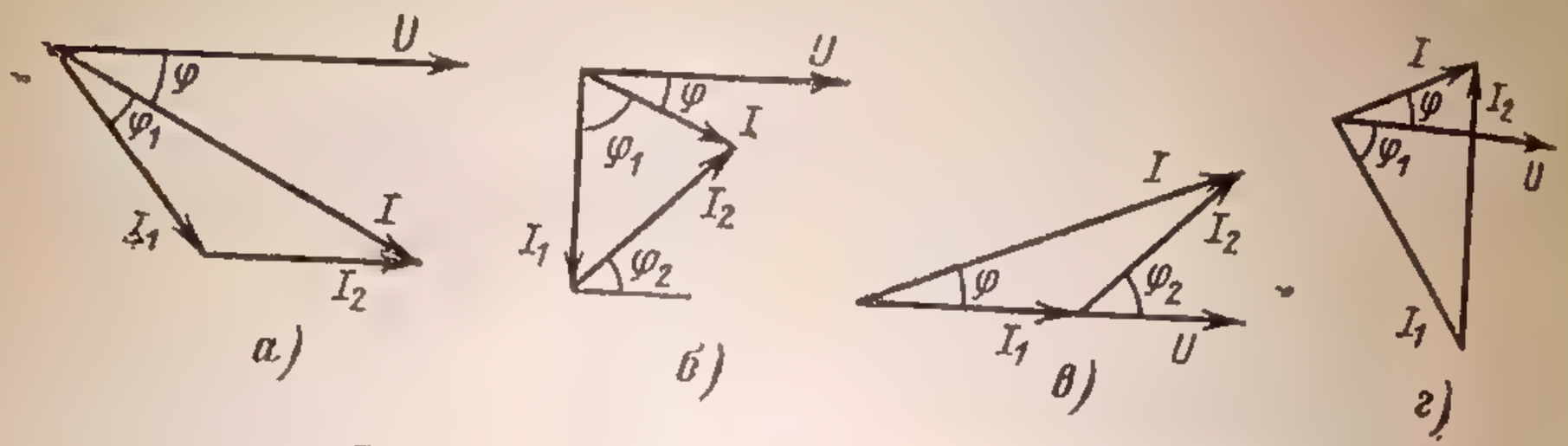


Рис. 7-33. К задачам 7-26, 7-27, 7-28, 7-29.

4. Определить эквивалентное реактивное сопротивление колебательного контура, включенного последовательно в цепь (рис 7-29), если при частоте 1 кГц реактивное сопротивление $x_L=100$ Ом, $x_C=10$ кОм. Решить ту же задачу при увеличении частоты в 10 и 100 раз.

5. Определить полное сопротивление цепи (рис. 7-29), для которой $r=20$ Ом, $x_L=10$ Ом, $x_C=40$ Ом. Решить ту же задачу при увеличении частоты вдвое.

6. Для цепи рис. 7-23 определить, какая из векторных диаграмм, изображенных на рис. 7-33, *а—г*, соответствует работе цепи при замкнутых контактах K_1, K_2, K_3, K_4.

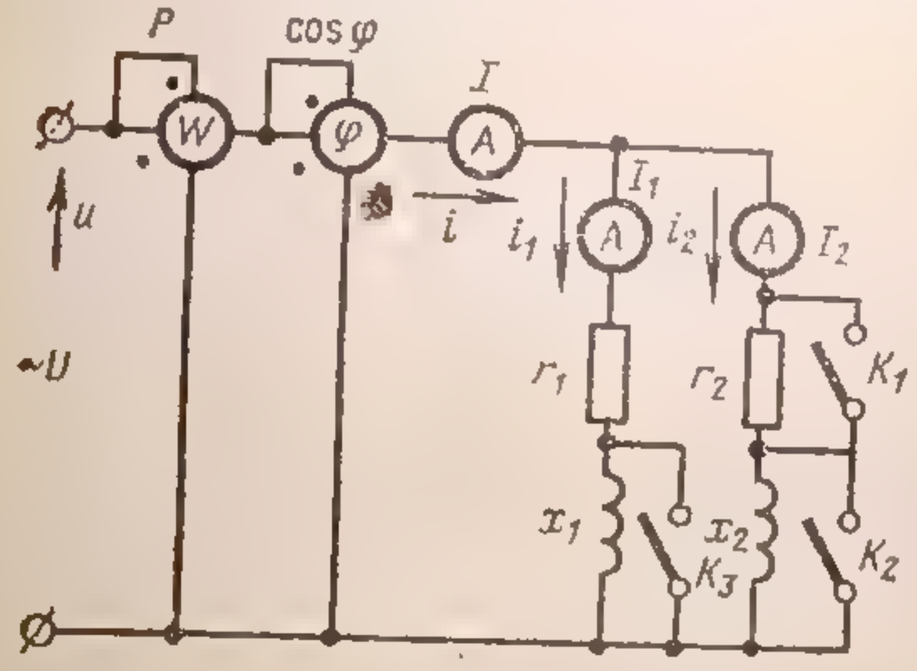


Рис. 7-34. К задачам 7-26, 7-27, 7-28, 7-30, 7-31.

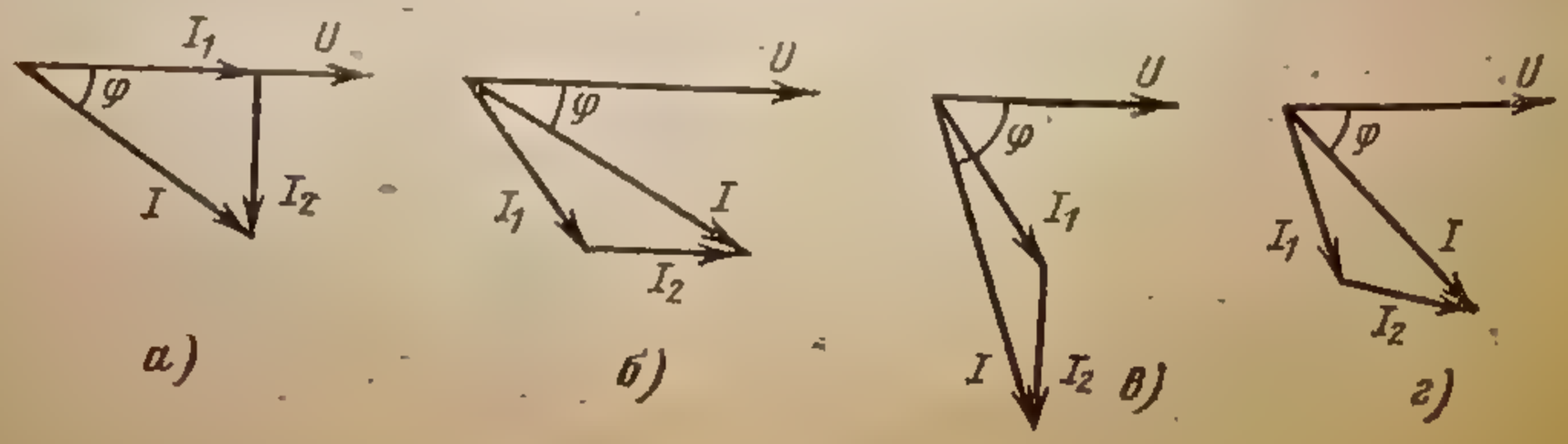


Рис. 7-35. К задачам 7-26, 7-27, 7-28.

7. Для цепи рис. 7-34 определить, какая из векторных диаграмм, изображенных на рис. 7-35, *а—г*, соответствует работе цепи при разомкнутых контактах, замкнутом контакте K_1, замкнутом контакте K_2 и одновременно замкнутых контактах K_1 и K_3.

7-29. Для цепи рис. 7-23 $r_1 = r_2 = 12$ Ом, $x_1 = x_2 = 16$ Ом. Приложенное напряжение 240 В. Построить векторную диаграмму и определить показания измерительных приборов в неразветвленной части цепи для следующих условий.

Условие 1. Все контакты разомкнуты.
Условие 2. Замкнут контакт K_1.
Условие 3. Замкнут контакт K_2.
Условие 4. Замкнут контакт K_3.
Условие 5. Замкнут контакт K_4.
Условие 6. Замкнуты контакты K_1 и K_3.

7-30. Для цепи рис. 7-34 $r_1 = 8$ Ом, $x_1 = 2$ Ом, $r_2 = 3$ Ом, $x_2 = 10$ Ом. Приложенное напряжение $U = 65$ В.

Построить векторную диаграмму и определить показания измерительных приборов в неразветвленной части цепи при следующих условиях.

Условие 1. Все контакты разомкнуты.
Условие 2. Замкнут контакт K_1.
Условие 3. Замкнут контакт K_2.
Условие 4. Замкнут контакт K_3.

7-31. По данным предыдущей задачи при разомкнутых контактах цепи (рис. 7-34) определить реактивное сопротивление и емкость конденсатора, при параллельном присоединении которого в цепи получился бы резонанс токов. Построить векторную диаграмму и определить в этом случае показания приборов в неразветвленной части цепи. Частоту сети принять равной 50 Гц.

7-32. Электроприемник мощностью 11 кВт питается от сети с напряжением 220 В, частотой 50 Гц и имеет $\cos\varphi = 0{,}4$.

Условие 1. Схемой замещения потребителя является цепь с последовательным соединением активного r и индуктивного x_L сопротивлений (рис. 7-5) или цепь с параллельным соединением сопротивлений r' и x_L (рис. 7-21). Определить указанные сопротивления для обеих схем замещения и построить векторную диаграмму.

Условие 2. Параллельно с электроприемником присоединяются конденсаторы (рис. 7-26), емкость которых от нуля постепенно увеличивают. Показания фазометра ($\cos\varphi$) при этом последовательно составляли: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 0,8; 0,6 и 0,4. Определить для всех показаний фазометра ток в неразветвленной части цепи, емкость включаемых конденсаторов, активную и реактивную мощность цепи. Построить векторную диаграмму.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

8-1. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ, ИНДУКТИРОВАННЫЕ В ОБМОТКАХ ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА. СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В ЗВЕЗДУ, НАЗНАЧЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО (НУЛЕВОГО) ПРОВОДА

8-1*. Обмотка статора трехфазного генератора переменного тока имеет шесть выводов (рис. 8-1, *а—в*), обозначенных буквами *A*, *B*, *C* (начала фаз), *X*, *Y*, *Z* (концы фаз)[1]. Максимальная э. д. с., индуктированная в каждой фазе обмотки генератора, $E_{ф.м}=179$ В.

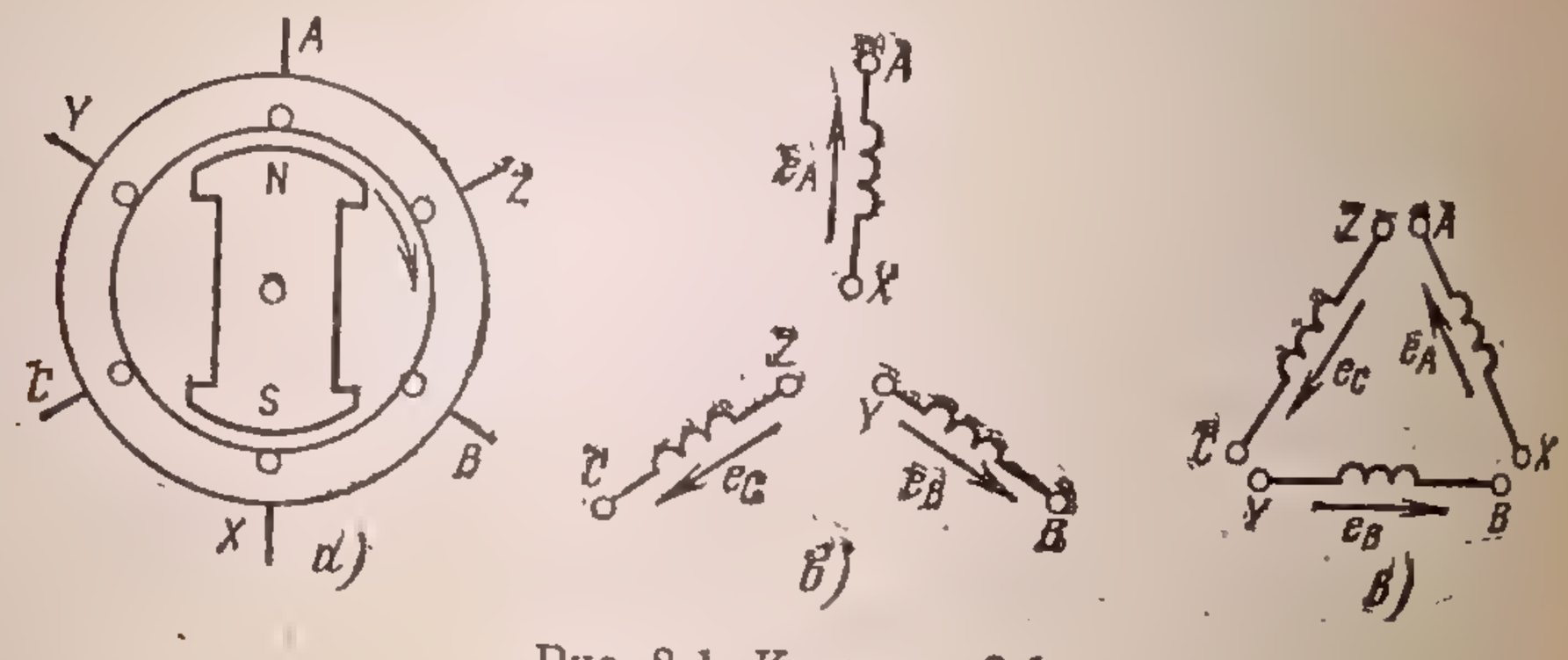


Рис. 8-1. К задаче 8-1.

Определить действующие значения фазных и линейных напряжений при соединении между собой следующих выводов: *X*, *Y*, *Z*; *X*, *B*, *Z*; *A*, *B*, *C*. Построить для всех случаев векторные диаграммы фазных и линейных напряжений.

Анализ и решение

При соединении выводов *X*, *Y* и *Z* мгновенные значения фазных напряжений могут быть представлены разностью соответствующих потенциалов, а именно:

$$u_A = \varphi_A - \varphi_X; \quad u_B = \varphi_B - \varphi_Y; \quad u_C = \varphi_C - \varphi_Z;$$

причем

$$\varphi_X = \varphi_Y = \varphi_Z = \varphi_0.$$

Линейные напряжения равны разности двух фазных: $u_{AB} = u_A - u_B = (\varphi_A - \varphi_0) - (\varphi_B - \varphi_0) = \varphi_A - \varphi_B$.

Аналогично $u_{BC} = u_B - u_C$ и $u_{CA} = u_C - u_A$.

---

[1] Обозначения *A*, *B*, *C*, *X*, *Y*, *Z* выбраны для удобства пользования индексами. В асинхронных машинах выводы обозначаются *C1*, ..., *C6*.

Для действующих значений те же выражения представляются в векторной форме:

$$\bar{U}_{AB}=\bar{U}_A-\bar{U}_B;\quad \bar{U}_{BC}=\bar{U}_B-\bar{U}_C \text{ и } \bar{U}_{CA}=\bar{U}_C-\bar{U}_A.$$

Векторная диаграмма этого случая дана на рис. 8-2, *а*.

При соединении выводов X, B, Z фазное напряжение второй фазы $u_Y=\varphi_Y-\varphi_B=-(\varphi_B-\varphi_Y)=-u_B$ будет представлено вектором U_Y, повернутым относительно вектора U_B на 180°. Линейные напряжения по-прежнему выражаются разностью двух фазных. Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 8-2, *б*.

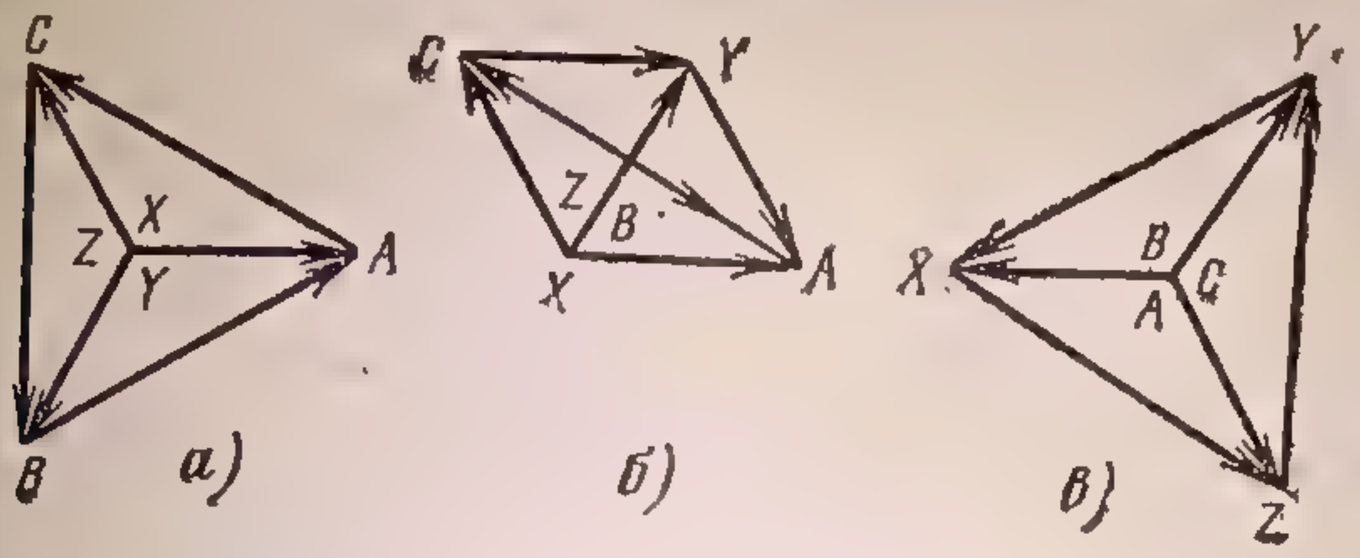


Рис. 8-2. К задаче 8-1.

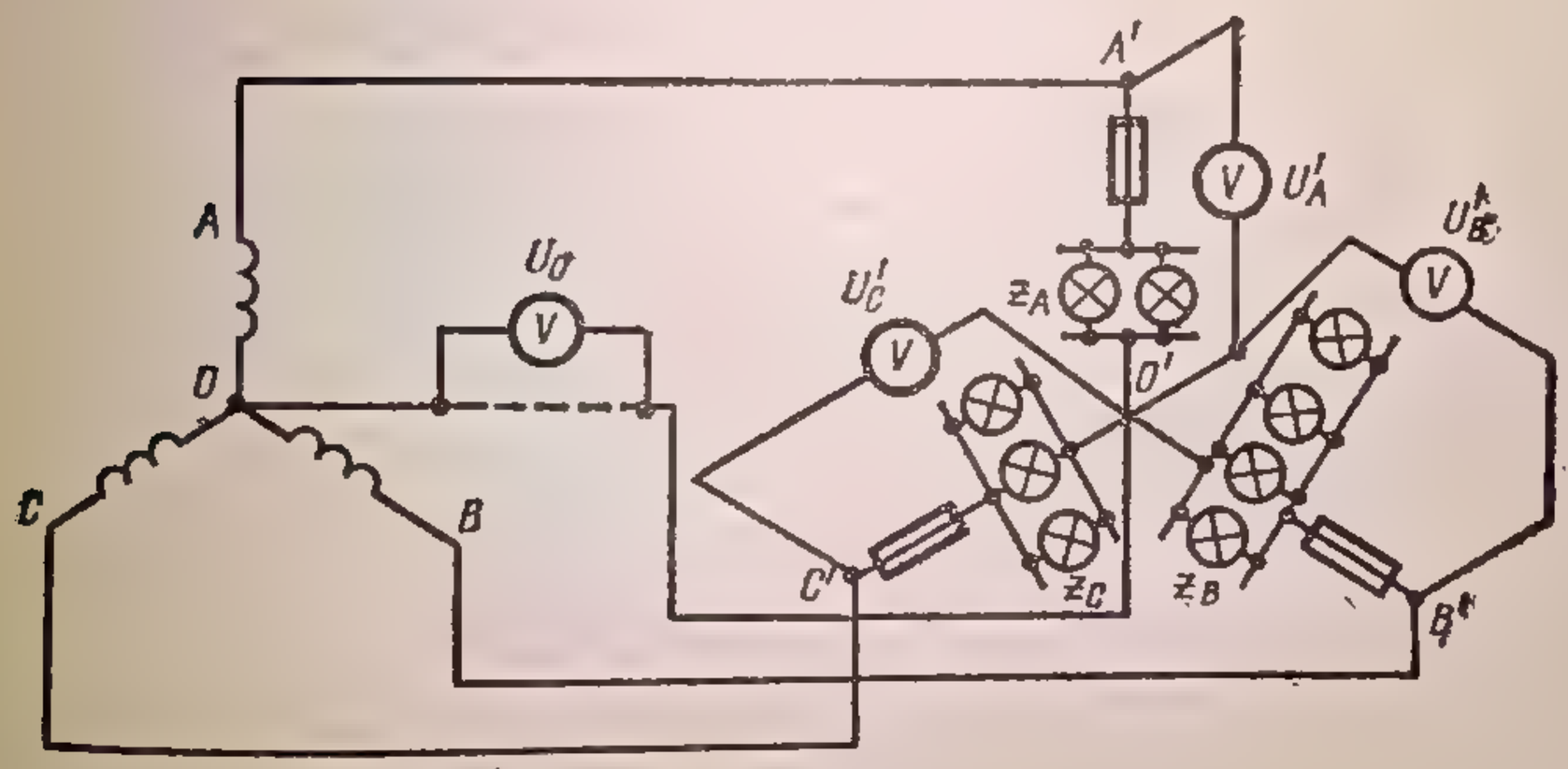


Рис. 8-3. К задаче 8-2.

Третий случай соединения выводов представлен векторной диаграммой на рис. 8-2, *в*.

8-2*. Три группы ламп, имеющие сопротивления $z_A=4$ Ом, $z_B=1$ Ом и $z_C=2$ Ом, соединены в звезду и включены в четырехпроводную трехфазную сеть с симметричными линейными напряжениями 208 В (рис. 8-3).

Условие 1. Определить токи в фазах потребителя и мощность, расходуемую в трехфазной цепи. Построить векторную диаграмму напряжений и токов и графически из векторной диаграммы определить ток в нейтральном проводе[1].

[1] Во всех случаях, когда нет специальных указаний в задаче, падениями напряжения в нейтральном и линейном проводах нужно пренебречь.

Анализ и решение

При наличии нейтрального провода фазные напряжения потребителя можно считать симметричными и равными:

$$U'_A = U'_B = U'_C = U_\phi = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \text{ В}.$$

Тогда фазные токи определятся:

$$I_A = \frac{U'_A}{z_A} = \frac{120}{4} = 30 \text{ А}; \quad I_B = \frac{U'_B}{z_B} = \frac{120}{1} = 120 \text{ А};$$

$$I_C = \frac{U'_C}{z_C} = \frac{120}{2} = 60 \text{ А}.$$

Мощность фаз потребителя получится:

$$P_A = U'_A I_A \cos\varphi_A = 120 \cdot 30 \cdot 1 = 3600 \text{ Вт};$$

$$P_B = U'_B I_B \cos\varphi_B = 14\,400 \text{ Вт}; \quad P_C = U'_C I_C \cos\varphi_C = 7200 \text{ Вт}.$$

При одной активной (ламповой) нагрузке $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = 1$.

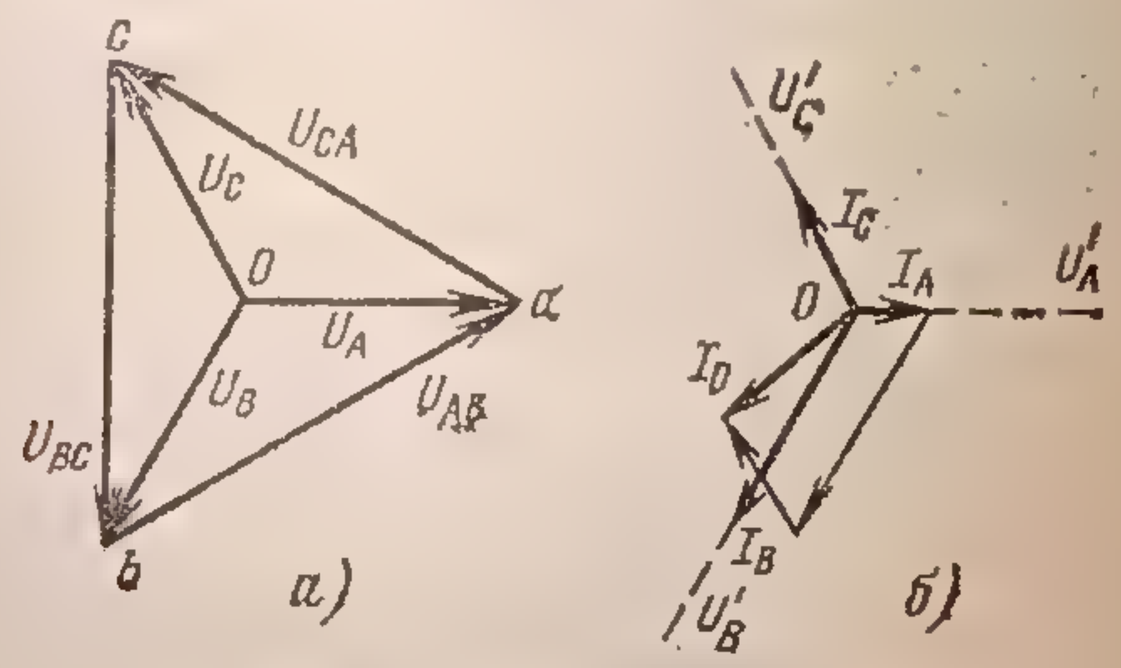


Рис. 8-4. К задаче 8-2.

Мощность, расходуемая в трехфазной цепи, теперь выразится: $P = P_A + P_B + P_C = 3{,}6 + 14{,}4 + 7{,}2 = 25{,}2$ кВт.

Векторные диаграммы напряжений и токов представлены на рис. 8-4, *а* и *б*. На векторной диаграмме токов (рис. 8-4, *б*) из точки 0 проведены штриховые линии, совпадающие с векторами фазных напряжений $\bar{ao}$, $\bar{bo}$, $\bar{co}$, показанными на рис. 8-4, *а*. Векторы фазных токов I_A, I_B и I_C должны быть построены в масштабе и образовывать с направлениями соответствующих векторов фазных напряжений углы φ_A, φ_B и φ_C, которые зависят от характера нагрузки. В данном случае мы имеем во всех трех фазах активную нагрузку (лампы накаливания), поэтому векторы токов совпадают по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений. Вектор тока в нейтральном проводе получен как геометрическая сумма векторов фазных токов: $\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$ (построение выполнено по правилу силового многоугольника).

Измерив длину вектора I_0, получим в выбранном масштабе для токов $I_0 = 80$ А.

Условие 2. В цепи произошел обрыв нейтрального провода. При этом оказалось, что на фазе A потребителя напряжение равно $U'_A = 160$ В, на фазе C потребителя $U'_C = 136$ В. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и определить графически напряжение на фазе B потребителя U'_B и напряжение между нейтралями генератора и потребителя U_0. Определить также токи в фазах потребителя.

Построить векторную диаграмму токов и определить графически, чему равна геометрическая сумма фазных токов.

Анализ и решение

При неравномерной нагрузке и обрыве нулевого провода фазные напряжения потребителя становятся несимметричными, возникает «смещение нейтрали», появляется напряжение между нулевой точкой потребителя и нулевой точкой генератора.

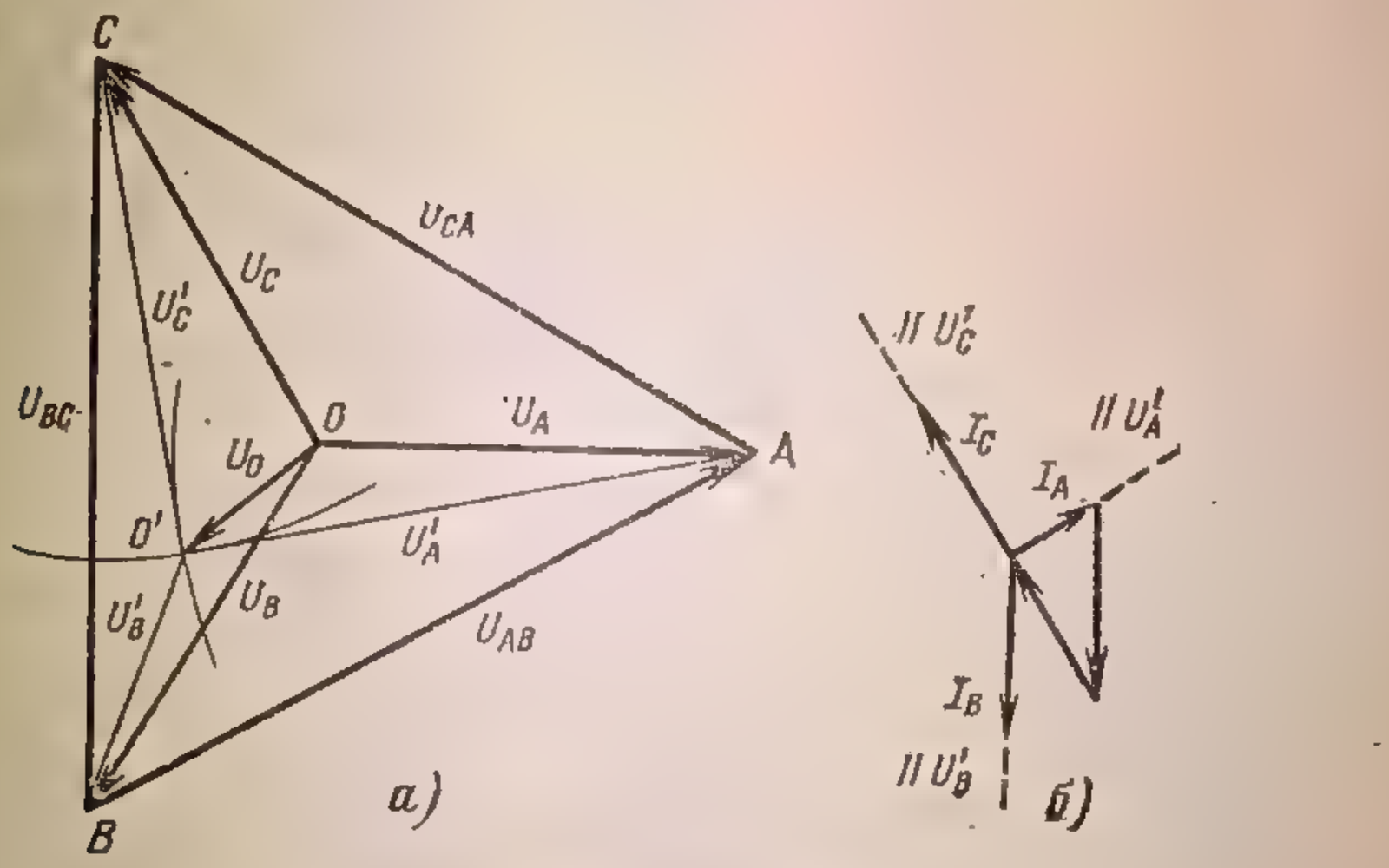


Рис. 8-5. К задаче 8-2.

Данная задача может быть решена графически. Для этого строим в масштабе три симметричных вектора фазных напряжений генератора OA, OB и OC (120 В). Соединяя концы их, получаем векторы линейных напряжений (208 В).

Из точки A как центра (рис. 8-5, *а*) засекаем дугу радиусом, равным в масштабе напряжению 160 В. Затем из точки C засекаем дугу радиусом, равным в том же масштабе 136 В. Точка пересечения дуг определяет положение нейтрали потребителя O' — длину векторов его фазных напряжений.

Измеряя длину соответствующих векторов, получаем в выбранном масштабе искомые напряжения: $U'_B = 78$ В; $U_0 = 46$ В.

Действительно, по второму закону Кирхгофа, как видно из схемы (рис. 8-3), для мгновенных значений имеем: $u_A + u_0 = u_A$, откуда $u'_A = u_A - u_0$. Для действующих значений:

$$\overline{U}'_A = \overline{U}_A - \overline{U}_0; \quad \overline{U}'_B = \overline{U}_B - \overline{U}_0; \quad \overline{U}'_C = \overline{U}_C - \overline{U}_0.$$

При этом линейные напряжения, определяемые разностью соответствующих фазных, остаются неизменными на выводах как потребителя, так и генератора. Указанные соотношения полностью отвечают построенной векторной диаграмме (рис. 8-5, *а*).

Теперь могут быть определены токи в фазах потребителя:

$$I_A = U'_A/z_A = 160/4 = 40 \text{ А}; \quad I_B = U'_B/z_B = 78/1 = 78 \text{ А};$$

$$I_C = U'_C/z_C = 136/2 = 68 \text{ А}.$$

Векторная диаграмма токов представлена на рис. 8-5, *б*. Векторы фазных токов проведены из точки O' на рис. 8-5, *б* параллельно векторам фазных напряжений $\overline{U}'_A$, $\overline{U}'_B$, $\overline{U}'_C$ (рис. 8-5, *а*), геометрическая сумма фазных токов $\overline{I}_A+\overline{I}_B+\overline{I}_C=0$.

8-3*. Трехфазная печь при нормальной работе потребляет мощность 10,5 кВт, имеет соединение в звезду и питается от трехфазной сети с линейным напряжением 380 В (рис. 8-6). Считая сопротивления фаз неизменными, определить фазные напряжения потребителя, линейные токи и узловое напряжение между нейтралями электроприемника и генератора U_0 в трех случаях: 1) при нормальной работе; 2) при коротком замыкании фазы A; 3) при обрыве фазы A (перегорание предохранителя). Как изменится в последних двух случаях мощность, потребляемая печью? Для всех случаев построить векторные диаграммы напряжений и токов. Задачу решить для индукционной печи, работающей с $\cos\varphi=0{,}8$, и для печи сопротивления, работающей с $\cos\varphi=1$.

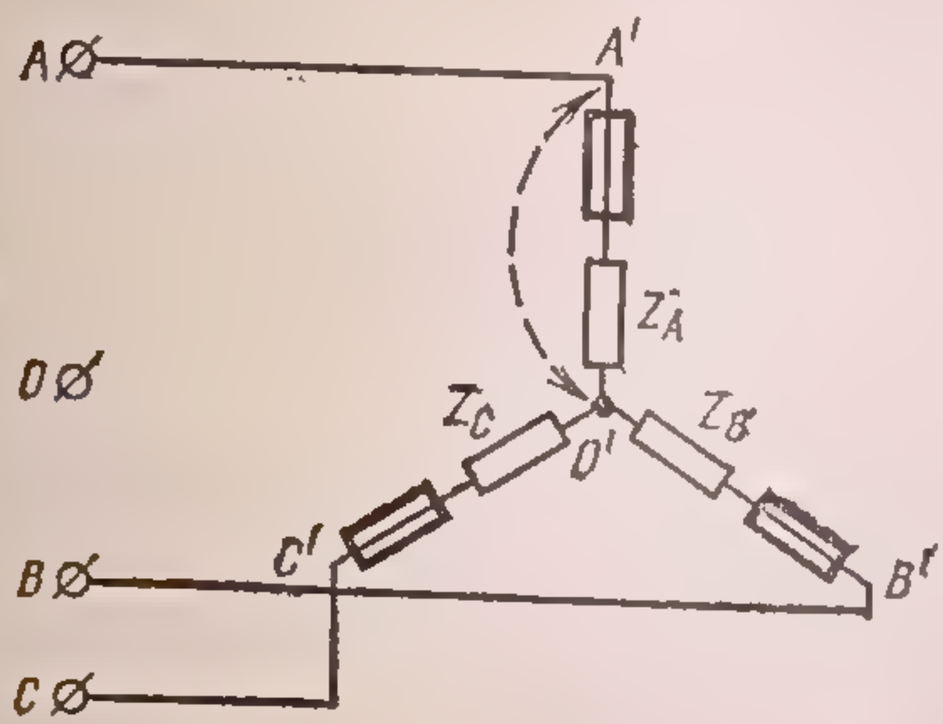


Рис. 8-6. К задаче 8-3.

Анализ и решение

При равномерной нагрузке и наличии нейтрального провода фазные напряжения электроприемника равны соответственно фазным напряжениям генератора. Одинаковыми будут и фазные токи $I_\Phi = U_\Phi/z_\Phi$. Векторная диаграмма токов и напряжений при $\cos\varphi=0{,}8$ и $\cos\varphi=1$ представлена на рис. 8-7, *а* и *б*. В обоих случаях ток в нейтральном проводе $\overline{I}_0=\overline{I}_A+\overline{I}_B+\overline{I}_C=0$, так как сумма векторов любых двух токов, сдвинутых по фазе на 120°, равна вектору третьего тока с обратным знаком (например, $\overline{I}_A+\overline{I}_B=-\overline{I}_C$). Отсутствие тока в нейтральном проводе говорит о том, что при равномерной нагрузке этот провод не нужен. Поэтому, если нагрузка заведомо является равномерной, как в случае, указанном в задаче трехфазной печи (рис. 8-6), нейтральный провод не прокладывается, токи и напряжения при нормальной работе будут симметричными (рис. 8-7), узловое напряжение между нейтралями электроприемника и генератора $U_0=0$, фазные напряжения потребителя

$$U_\Phi = U_л/\sqrt{3} = 380/1{,}73 = 220 \text{ В}.$$

При равномерной нагрузке мощность трехфазной цепи $P=3P_ф$, где $P_ф=U_ф I_ф \cos\varphi_ф$ — мощность одной фазы потребителя. Выражая фазное напряжение через линейное и учитывая, что при соединении в звезду фазный ток равен линейному, получаем:

$$P=3U_ф I_ф \cos\varphi_ф=3\frac{U_л}{\sqrt{3}} I_л \cos\varphi_ф=\sqrt{3}U_л I_л \cos\varphi_ф.$$

Отсюда $I_л=P/\sqrt{3}U_л \cos\varphi_ф$. Подставляя числовые данные, при $\cos\varphi=0{,}8$ будем иметь $I_{ф1}=I_{л1}=20$ А и при $\cos\varphi=1$ $I_{ф2}=I_{л2}=16$ А.

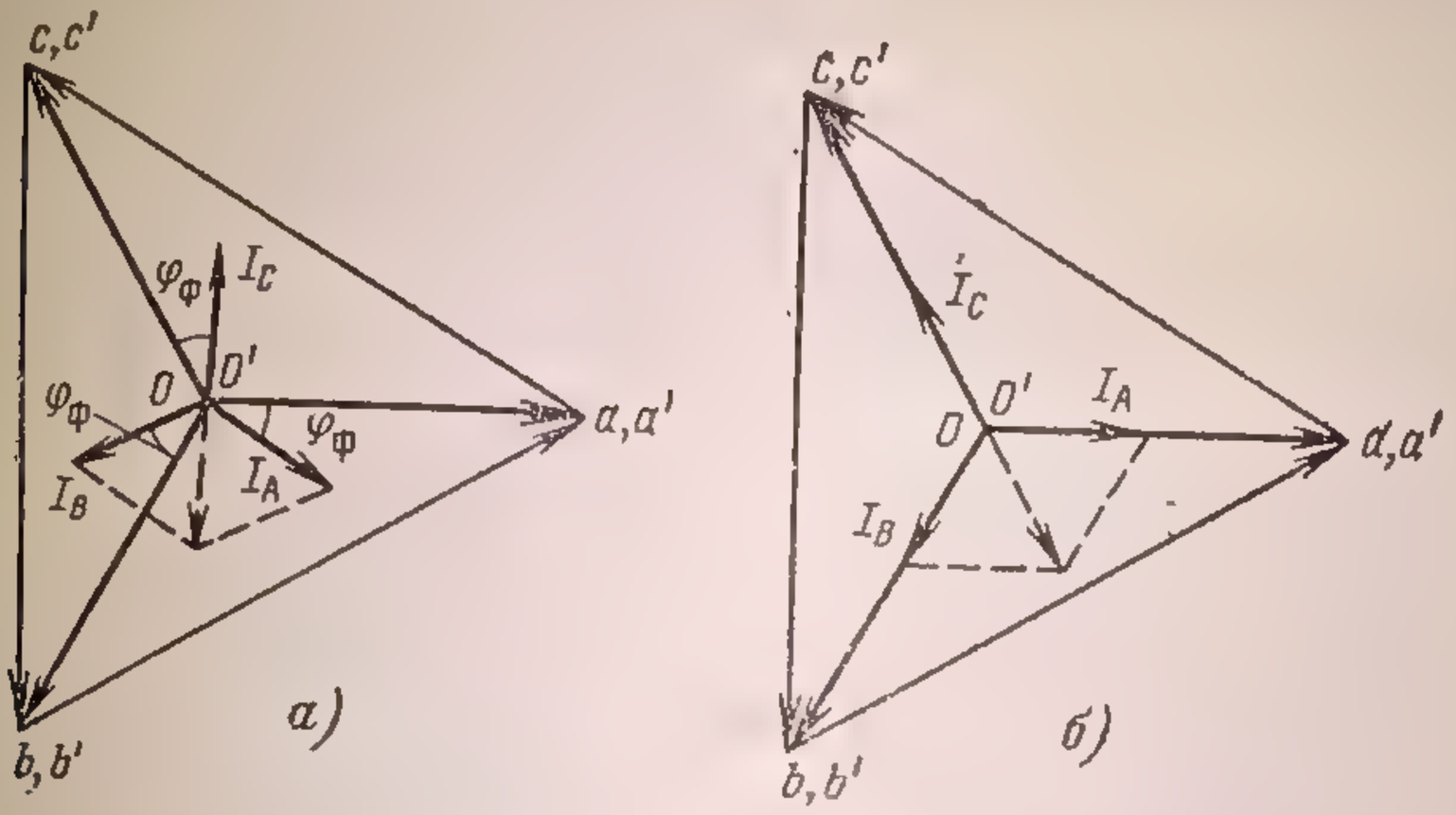


Рис. 8-7. К задаче 8-3.

Определим теперь полные сопротивления фаз печи, которые нам понадобятся в дальнейшем: при $\cos\varphi=0{,}8$ $z_{ф1}=U_ф/I_{ф1}=220/20=11$ Ом, при $\cos\varphi=1$ $z_{ф2}=U_ф/I_{ф2}=220/16=13{,}75$ Ом.

При коротком замыкании на фазе A электроприемника (рис. 8-6) напряжение на этой фазе $U'_A=0$, потенциалы точек O' и A' будут равны. С другой стороны, если пренебрегать падением напряжения в проводах, равны также потенциалы точек A и A'. Следовательно, узловое напряжение (смещение нейтрали), определяемое разностью потенциалов точек O' и O, выразится: $u_0=\varphi_0-\varphi_0$. Заменяя потенциал точки O' (φ'_0) равным ему потенциалом точки A (φ_A), получаем $u_0=\varphi_A-\varphi_0=u_A$, т. е. смещение нейтрали равно фазному напряжению генератора. Поэтому на топографической (потенциальной) векторной диаграмме, показанной на рис. 8-8, *а*, точка O' совмещается с точкой a. Векторы, соединяющие точку O' со всеми вершинами (a, b, c) потенциального треугольника, выразят напряжение на фазах электроприемника. Следовательно, $\overline{U}'_A=0$; $\overline{U}'_B=-\overline{U}_{AB}$ и $\overline{U}'_C=\overline{U}_{CA}$ т. е. на фазах B и C электроприемника напряжения равны линейным, $U'_B=U'_C=380$ В.

На векторной диаграмме (рис. 8-8, *а*) показаны также векторы токов фаз B и C для индукционной печи, работающей с $\cos\varphi=0{,}8$,

$I_{B1}=I_{C1}=U'_B/z_{\Phi 1}=380/11=34{,}5$ А. Для печи сопротивления с $\cos\varphi=1$ токи будут совпадать по фазе с соответствующими напряжениями, и значения их $U'_B/z_{\Phi 2}=380/13{,}75=27{,}7$ А.

Ток в замкнутой накоротко фазе I_A определится из условия $\overline{I}_A+\overline{I}_B+\overline{I}_C=0$. Отсюда $\overline{I}_A=-(\overline{I}_B+\overline{I}_C)$.

Угол между векторами токов I_B и I_C равен 60°. Следовательно, в равнобедренном треугольнике токов угол при вершине 120°. Из этого треугольника следует, что его основание или в масштабе токов $I_A=I_B\sqrt{3}$. При $\cos\varphi=0{,}8$ $I_{A1}=60$ А, при $\cos\varphi=1$ $I_{A2}=48$ А.

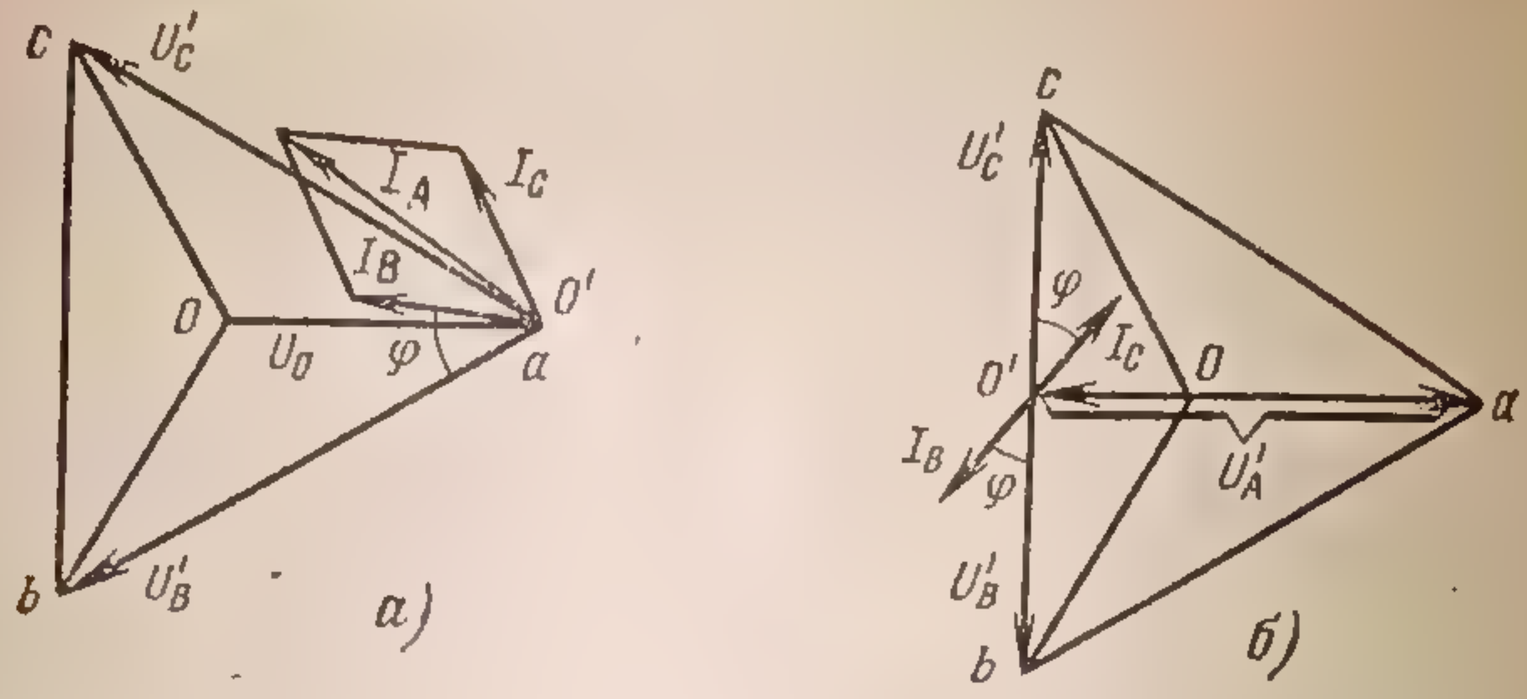


Рис. 8-8. К задаче 8-3.

При обрыве фазы A (перегорание предохранителя) две другие фазы окажутся под линейным напряжением U_{BC} при последовательном соединении.

Точка O' на потенциальной диаграмме должна разделить вектор линейного напряжения U_{BC} на части, пропорциональные последовательно соединенным сопротивлениям двух работающих фаз. Поэтому точка O' расположится на стороне bc потенциального треугольника, а при равных сопротивлениях фаз B и C — на середине этой стороны, как показано на рис. 8-8, *б*. На этой же диаграмме показаны векторы токов I_B и I_C для индукционной печи, работающей с $\cos\varphi=0{,}8$:

$$I_{B1}=\frac{380}{z_{\Phi 1}}=\frac{U'_B}{2\cdot 11}=17{,}25\text{ А};\quad I_{C1}=\frac{U'_C}{z_{\Phi 1}}=17{,}25\text{ А}.$$

При $\cos\varphi=1$:

$$I_{B2}=\frac{U'_B}{z_{\Phi 2}}=\frac{380}{2\cdot 13{,}75}=13{,}85\text{ А};\quad I_{C2}=13{,}8\text{ А}.$$

Токи I_B и I_C равны и сдвинуты по фазе на 180°, поэтому ток $\overline{I}_A=-(\overline{I}_B+\overline{I}_C)=0$.

При коротком замыкании и при обрыве фазы нагрузка становится неравномерной и определение мощности следует производить

по формуле $P=U'_A I_A \cos\varphi_A + U'_B I_B \cos\varphi_B + U'_C I_C \cos\varphi_C$. Расчеты предоставляем выполнить самим учащимся.

Вопросы и упражнения к задачам 8-1—8-3

1. Определить э. д. с., действующую в замкнутой обмотке трехфазного генератора при ее соединении в правильный треугольник, рис. 8-1, *а* и *б* (соединены выводы *A*—*Z*, *B*—*X*, *C*—*Y*); в неправильный треугольник (соединены выводы *A*—*Z*, *B*—*C*, *Y*—*X*). Построить для этих случаев векторные диаграммы. Максимальное значение э. д. с. одной фазы $E_{ф.м}=179$ В.

2. Электроприемник, соединенный в звезду, питается по четырехпроводной линии от трехфазного генератора, обмотки которого также соединены в звезду, с выведенной нейтральной точкой (рис. 8-9). Линейное напряжение генератора $U_л=380$ В; полное сопротивление каждой фазы электроприемника, содержащего индуктивность, $z_ф=20$ Ом, $\cos\varphi=0{,}8$. Определить токи в нейтральном

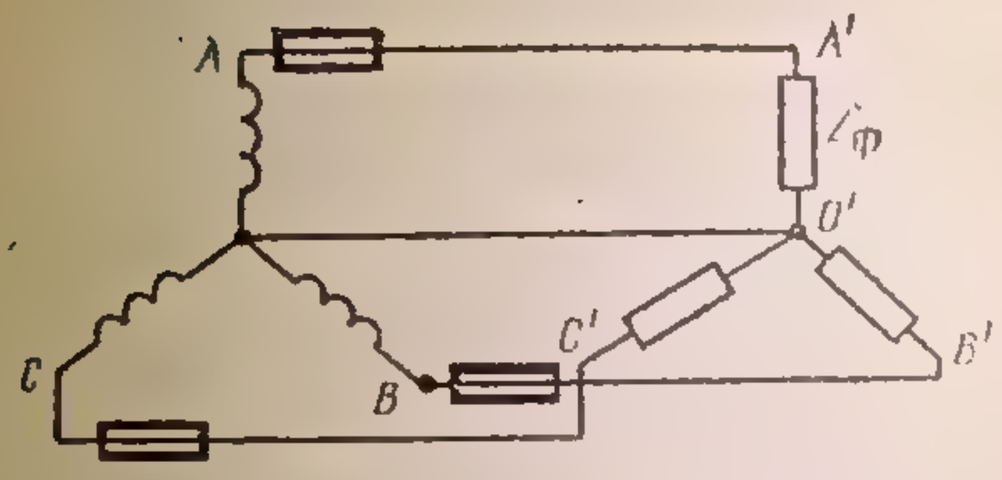


Рис. 8-9. К задачам 8-1, 8-2, 8-3.

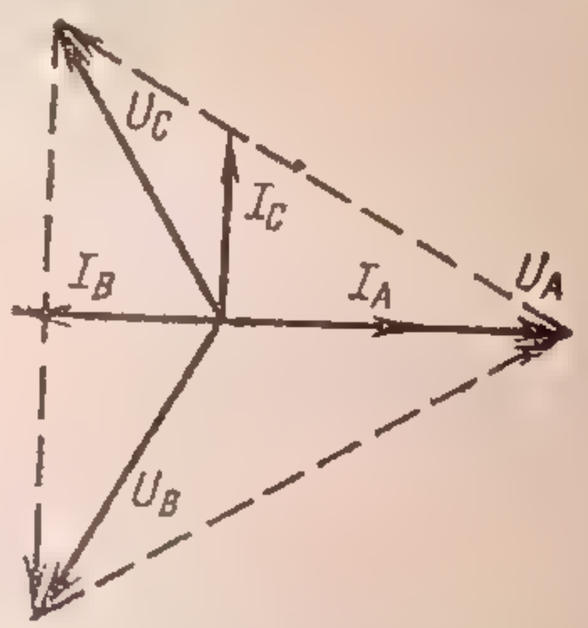


Рис. 8-10. К задачам 8-1, 8-2, 8-3.

и линейном проводах, фазные и линейные напряжения потребителя, мощность, расходуемую в цепи. Как изменятся токи и напряжения, если произойдет обрыв нейтрального провода? Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

3. В четырехпроводной трехфазной цепи с линейным напряжением $U_л=208$ В соединены в звезду три электроприемника, имеющие одинаковые полные сопротивления $z_ф=20$ Ом. Коэффициенты мощности приемников: $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\cos\varphi_C$. Характер нагрузок указан в таблице (см. стр. 174).

Построить векторную диаграмму напряжений и токов, вычертить схему соединений электроприемников с учетом характера нагрузки и определить ток в нейтральном проводе.

4. Для четырехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников в звезду векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 8-10. Фазные токи $I_A=I_B=I_C=10$ А. Вычертить схему соединений приемников с учетом характера нагрузки и определить ток в нейтральном проводе.

5. В четырехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников в звезду фазные токи $I_A=I_B=I_C=10$ А. Коэффициенты мощности приемников: $\cos\varphi_A$, $\cos\varphi_B$, $\cos\varphi_C$. Характер нагрузок для четырех случаев *а*—*г* указан в таблице. Определить, для какого случая ток в нейтральном проводе равен 27,3; 14,1; 10; 7,3 А.

Таблица к стр. 173

Случай	Фаза A		Фаза B		Фаза C	
	$\cos\varphi_A$	Нагрузка	$\cos\varphi_B$	Нагрузка	$\cos\varphi_C$	Нагрузка
1	1	Активная	0,5	Емкостная	1	Активная
2	1	Активная	0,5	Индуктивная	0,5	Емкостная
3	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	Индуктивная	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	Индуктивная	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	Индуктивная
4	1	Активная	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Индуктивная	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Емкостная
5	0	Индуктивная	1	Активная	1	Активная

Случай	Фаза A		Фаза B		Фаза C	
	$\cos\varphi_A$	Нагрузка	$\cos\varphi_B$	Нагрузка	$\cos\varphi_C$	Нагрузка
а	1	Активная	0	Емкостная	0	Индуктивная
б	1	Активная	0	Емкостная	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Емкостная
в	1	Активная	0	Индуктивная	0	Емкостная
г	0	Емкостная	1	Активная	1	Активная

8-4. В трехфазную сеть с линейным напряжением 121 В включены два однофазных электроприемника, которые имеют одинаковые полные сопротивления $z_\Phi = 10$ Ом. Коэффициенты мощности электроприемников $\cos\varphi_B$ и $\cos\varphi_C$. Характер нагрузок указан в таблице.

№ п/п.	Фаза B		Фаза C	
	$\cos\varphi_B$	Нагрузка	$\cos\varphi_C$	Нагрузка
1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Индуктивная	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Емкостная
2	1	Активная	1	Активная
3	0,5	Индуктивная	0,5	Емкостная
4	1	Активная	0,5	Индуктивная
5	1	Активная	0,5	Емкостная
6	0	Индуктивная	0,5	Индуктивная
7	0	Емкостная	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	Емкостная

Условие 1. Электроприемники включены в четырехпровод-

Определить активное и реактивное сопротивления электроприемников, ток в нулевом проводе, напряжение, ток и мощность каждого электроприемника.

Условие 2. Электроприемники включены в четырехпроводную сеть, как указано на схеме рис. 8-11.

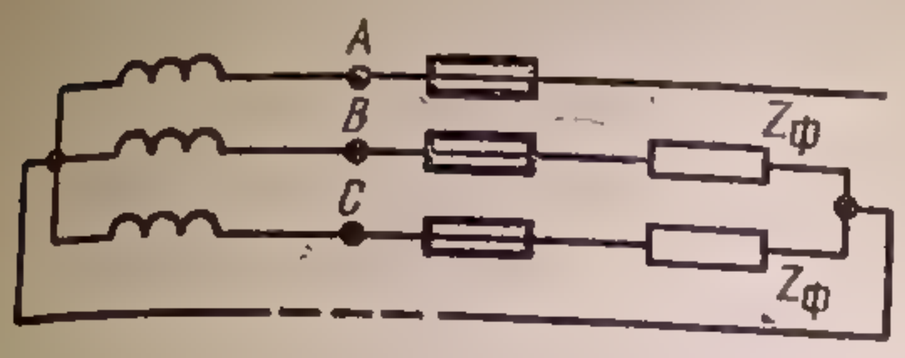


Рис. 8-11. К задаче 8-4.

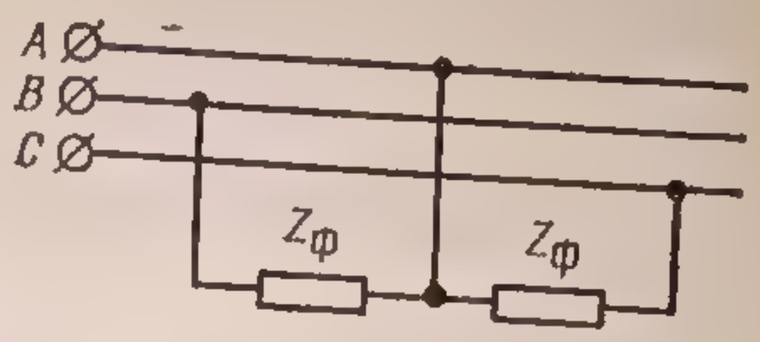


Рис. 8-12. К задаче 8-4.

Определить ток, напряжение и мощность каждого электроприемника при обрыве нейтрального провода.

Условие 3. Электроприемники включены в трехпроводную сеть, как указано на схеме (рис. 8-12).

Определить токи в линейных проводах и мощность трехфазной цепи.

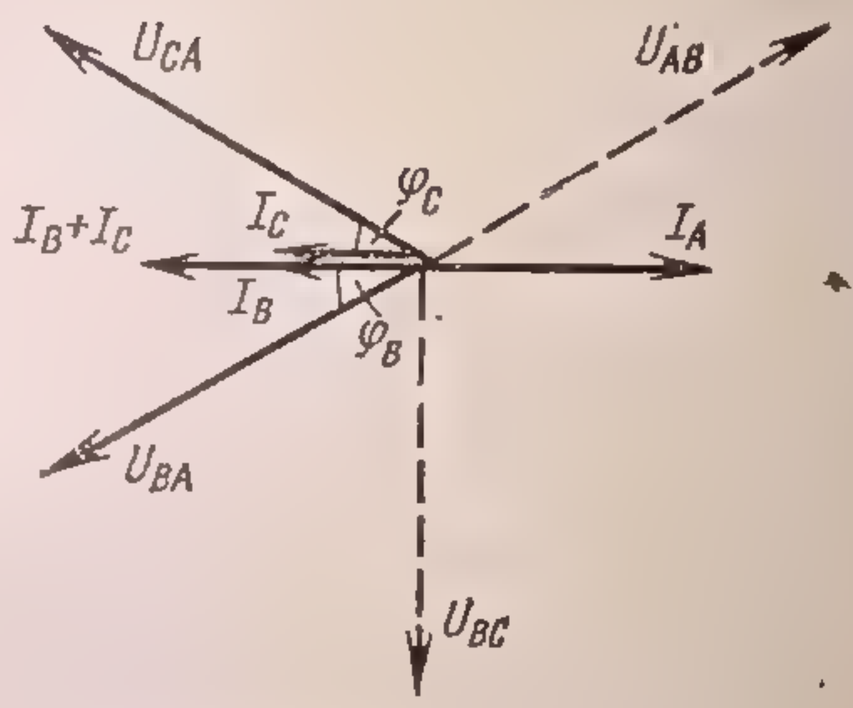


Рис. 8-13. К задаче 8-4.

Указание. Каждый из электроприемников, включенный по схеме рис. 8-12, находится под линейным напряжением: один под напряжением U_{BA}, другой под напряжением U_{CA}. Линейные напряжения U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} образуют симметричную систему векторов, сдвинутых относительно друг друга по фазе на 120° (рис. 8-13). Вектор U_{BA} равен по значению и противоположен по направлению вектору U_{AB}.

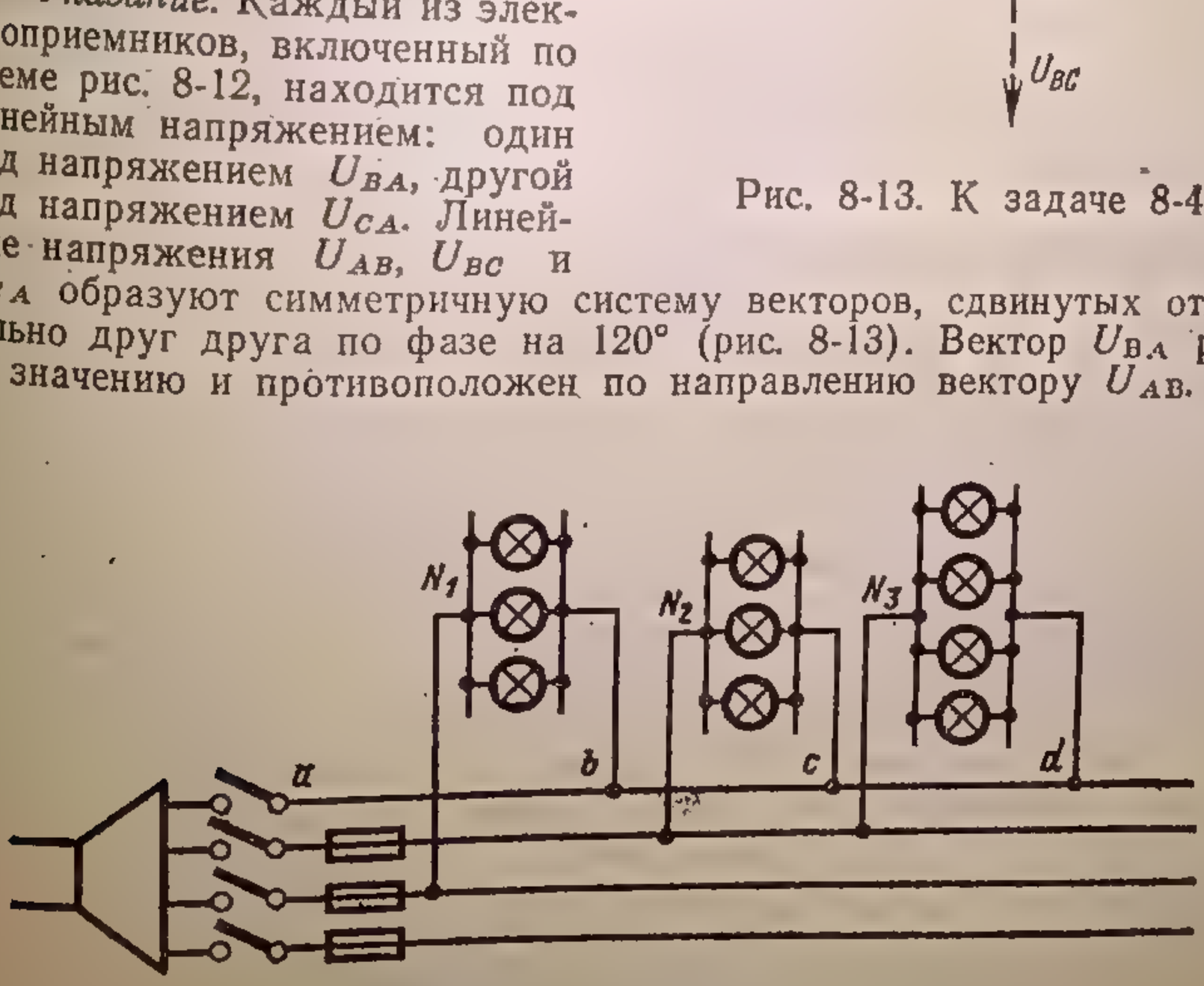


Рис. 8-14. К задаче 8-5.

Фазные токи, они же линейные, I_B и I_C определятся:

$$I_B = \frac{U_{BA}}{z_\Phi} \text{ и } I_C = \frac{U_{CA}}{z_\Phi}.$$

В таблице разных вариантов данных задачи 8-4 даны косинусы углов, под которыми должны быть проведены векторы этих токов относительно векторов соответствующих напряжений в зависимости от характера нагрузки. На рис. 8-13 показаны векторы токов для первого варианта данных. Линейный ток I_A легко определить из векторной диаграммы на основании равенства $\bar{I}_A+\bar{I}_B+\bar{I}_C=0$, откуда $\bar{I}_A=-(\bar{I}_B+\bar{I}_C)$.

Аналогично выполняется построение и определяется линейный ток для других вариантов данных.

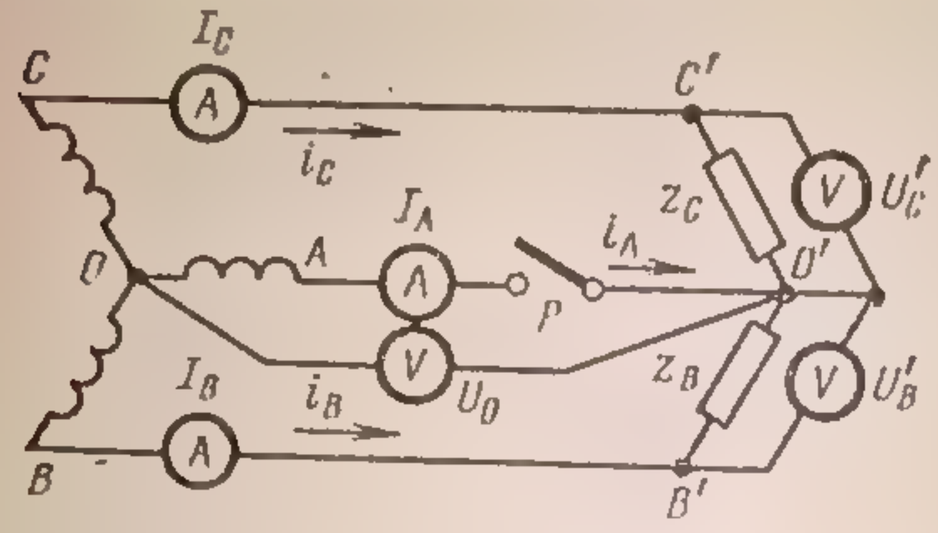


Рис. 8-15. К задаче 8-7.

8-5. От общей четырехпроводной сети с линейным напряжением 220 В питаются размещенные в разных цехах три группы ламп (рис. 8-14). В среднем мощность каждой лампы составляет 50 Вт при номинальном напряжении 127 В. Число одновременно горящих ламп в каждой группе N_1, N_2 и N_3. Построить векторную диаграмму напряжений и токов и определить ток в нулевом проводе [1] на участках *ab*, *bc* и *cd*. Определить также мощность, расходуемую на освещение цехов.

№ п/п.	N_1	N_2	N_3	№ п/п.	N_1	N_2	N_3
1	80	30	30	4	0	30	30
2	30	30	30	5	200	30	30
3	20	30	30	6	80	30	50

8-6. Решить предыдущую задачу при перегоревшем предохранителе: а) в первой группе ламп (N_1); б) во второй группе ламп (N_2).

8-7. Два нагревательных прибора, обладающих только активным сопротивлением $z_B=r_B=10$ Ом и $z_C=r_C=20$ Ом, включены в трехпроводную трехфазную цепь, как указано на схеме рис. 8-15. Линейное напряжение $U_л=208$ В. Определить напряжения потребителей U'_B и U'_C, линейные токи I_A, I_B, I_C и смещение нейтрали U_0. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Условие 1. Рубильник P включен.

Условие 2. Рубильник P выключен.

[1] Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) нейтральный провод называется нулевым, если нейтраль (нулевая точка генератора) заземлена.

Указание. Положение точки O' на стороне bc потенциальной векторной диаграммы (см. ответы, рис. 13-2, *б*) определяется из соотношений $\overline{I}_B+\overline{I}_C=0$ или $U'_B/z_B=U'_C/z_C$ и $U'_B+U'_C=208$ В. Напряжения U'_A и U_0 находятся графически из векторной диаграммы.

8-8. Три однофазных электроприемника, соединенных в звезду, питаются от трехфазного генератора, обмотки которого соединены в треугольник (рис. 8-16). Сопротивления фаз электроприемников $r_A=r_B=r_C=5$ Ом; $x_A=x_B=x_C=8{,}65$ Ом; $f=50$ Гц; линейное

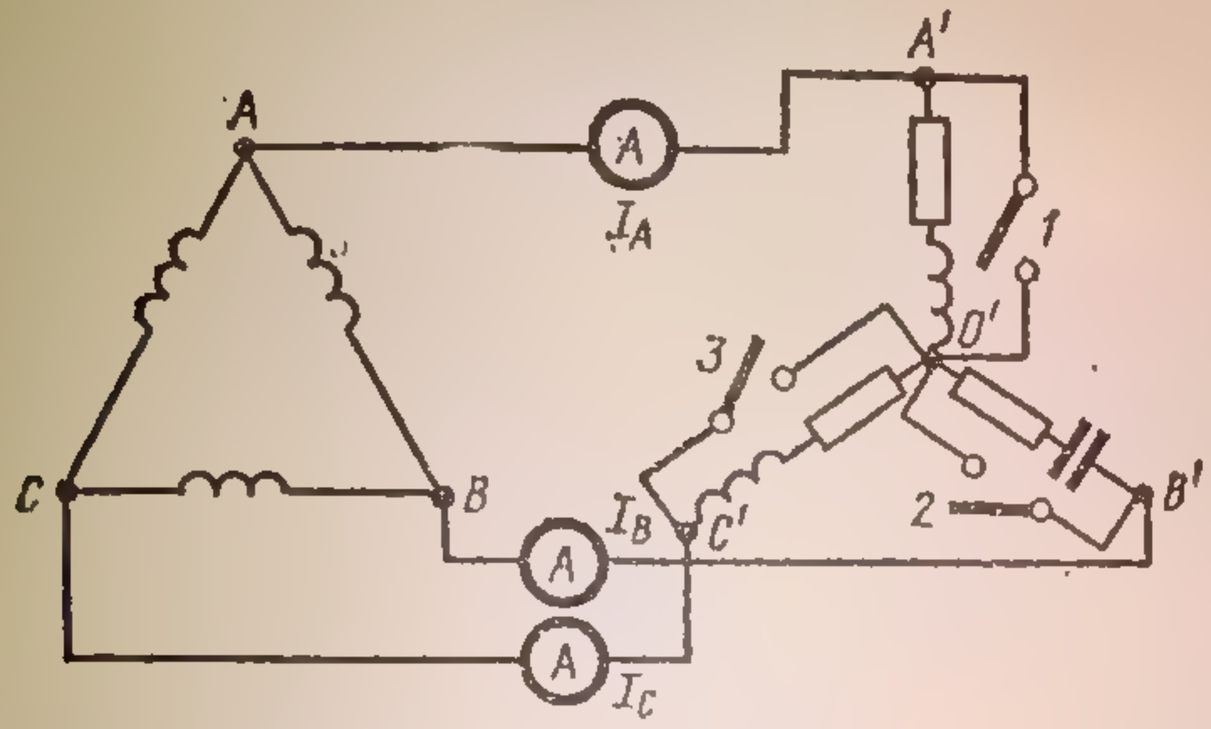


Рис. 8-16. К задаче 8-8.

напряжение генератора равно 120 В. Определить линейные токи в трех проводах сети, если замкнуть сначала рубильник *1* (*2* и *3* разомкнуты), затем замкнуть рубильник *2* (*1* и *3* разомкнуты) и, наконец, рубильник *3* (*1* и *2* разомкнуты). Для всех случаев построить векторные диаграммы напряжений и токов.

8-2. ТРЕХПРОВОДНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В ЗВЕЗДУ И В ТРЕУГОЛЬНИК. ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ, ПОВЫШЕНИЕ ЕГО

8-9*. Как изменятся линейные токи и мощность трехфазной цепи, если при неизменном линейном напряжении $U_л$ три одинаковых электроприемника с полным сопротивлением каждого из них $z_ф$ пересоединить со звезды на треугольник?

Анализ и решение

При соединении трех одинаковых электроприемников в звезду их фазные токи, они же линейные, выразятся:

$$I_{фY}=I_{лY}=U_{фY}/z_ф=U_л/\sqrt{3}\,z_ф.$$

Здесь фазные напряжения при соединении в звезду

$$U_{фY}=U_л/\sqrt{3}.$$

При соединении этих же электроприемников в треугольник их фазные токи выразятся:

$$I_{\phi\Delta} = U_{\phi\Delta}/z_\phi = U_л/z_\phi .$$

Линейные токи будут в 3 раза больше:

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} U_л/z_\phi .$$

Отношение линейного тока при соединении в треугольник к линейному току при соединении в звезду будет:

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \frac{\sqrt{3}\, U_л}{z_\phi} : \frac{U_л}{\sqrt{3}\, z_\phi} = 3.$$

Таким образом, линейный ток увеличится в 3 раза. Мощность трехфазной цепи при равномерной нагрузке равна утроенной мощности одной фазы:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi .$$

При соединении в звезду

$$U_{\phi Y} = U_л/\sqrt{3}; \quad I_{лY} = I_{\phi Y};$$

при соединении в треугольник

$$U_{\phi\Delta} = U_л \text{ и } I_{\phi\Delta} = I_{л\Delta}/\sqrt{3} .$$

Выражая фазные напряжение и ток через линейные, получаем выражение для мощности:

при соединении в звезду

$$P_Y = \sqrt{3}\, U_л I_{лY} \cos\varphi_\phi ;$$

при соединении в треугольник

$$P_\Delta = \sqrt{3} U_л I_{л\Delta} \cos\varphi_\phi .$$

В выражениях для мощности различаться будут только линейные токи. Поэтому мощность при соединении в треугольник также увеличится в 3 раза.

Для того чтобы линейный ток и мощность при соединении электроприемников в треугольник были такими же, как при соединении в звезду, нужно сопротивления фаз при соединении в треугольник увеличить в 3 раза, т. е. $z_{\phi\Delta} = 3z_{\phi Y}$. Тогда отношение линейных токов

$$\frac{I_{л\Delta}}{I_{лY}} = \frac{\sqrt{3}\, U_л}{z_{\phi\Delta}} : \frac{U_л}{\sqrt{3}\, z_{\phi Y}} = \frac{3z_{\phi Y}}{z_{\phi\Delta}} = \frac{3z_{\phi Y}}{3z_{\phi Y}} = 1;$$

отсюда $I_{л\Delta} = I_{лY}$ и $P_\Delta = P_Y$.

Коэффициент мощности при этом остается также неизменным, так как при увеличении полного сопротивления фаз в 3 раза во столько же раз по условию задачи должны быть увеличены их активные и реактивные сопротивления. Поэтому

$$\cos\varphi = r_{\phi Y}/z_{\phi Y} = r_{\phi\Delta}/z_{\phi\Delta} .$$

Произведенная замена соединения в звезду соединением в эквивалентный треугольник (или наоборот), когда линейные токи, мощность и $\cos\varphi$ остаются неизменными, часто практикуется в расчетах трехфазных цепей, так как приводит в ряде случаев к существенным упрощениям.

8-10*. Домовый кабельный ввод (рис. 8-17) имеет напряжение 220 В. Распределенная по трем этажам осветительная нагрузка определяется в среднем на каждый этаж мощностью $P_{AB}=P_{1эт}=3600$ Вт; $P_{BC}=P_{2эт}=6000$ Вт; $P_{CA}=P_{3эт}=6000$ Вт.

Условие 1. Определить напряжения и токи группы ламп каждого этажа. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов и графически определить токи в жилах кабеля.

Анализ и решение

Пренебрегая падением напряжения в жилах кабеля, можно считать, что напряжение на выводах каждой группы ламп равно линейному (оно же фазное) напряжению сети, так как $U_ф=U_л=220$ В.

Тогда фазные токи каждой группы ламп определятся:

$$I_{AB}=P_{AB}/U_ф=3600/220=16{,}4\ \text{А};$$

$$I_{BC}=P_{BC}/U_ф=6000/220=27\ \text{А};$$

$$I_{CA}=P_{CA}/U_ф=6000/220=27\ \text{А}.$$

Линейные токи определяются графически из векторной диаграммы, представленной на рис. 8-18. Каждый из линейных токов равен геометрической разности двух фазных токов: $\overline{I}_A=\overline{I}_{AB}-\overline{I}_{CA}$; $\overline{I}_B=\overline{I}_{BC}-\overline{I}_{AB}$; $\overline{I}_C=\overline{I}_{CA}-\overline{I}_{BC}$. Вектор линейного тока соединяет концы векторов фазных токов, проведенных из одной точки, и направлен к уменьшаемому.

Векторы фазных токов построены в масштабе. В данном случае при активной нагрузке они совпадают по фазе с соответствующими напряжениями. Измерив длины векторов линейных токов, получим в масштабе для токов $I_A=38$ А; $I_B=38$ А; $I_C=47$ А.

Условие 2. Определить напряжение ламп каждого этажа и токи в жилах кабеля при перегорании одного из предохранителей.

Анализ и решение

При перегорании одного из предохранителей получается цепь однофазного переменного тока с параллельным соединением одной группы ламп с двумя другими, соединенными последовательно.

Для определения токов найдем предварительно сопротивления фаз из условия нормальной работы [1]. По найденным токам фаз (из решения задачи по условию 1) выразим их сопротивления:

$$z_{AB}=\frac{U_{AB}}{I_{AB}}=\frac{220}{16{,}4}=13{,}4\ \text{Ом};\quad z_{BC}=z_{CA}=\frac{220}{27}=8{,}15\ \text{Ом}.$$

[1] Изменением сопротивления нитей лампы накаливания в фазах *AB* и *CA*, обусловленным меньшей температурой вследствие уменьшения тока, в данном случае пренебрегаем. В действительности сопротивления ламп этих двух фаз будут несколько меньше.

Теперь определим токи при перегоревшем одном предохранителе 1, например (рис. 8-17), в этом случае фаза BC находится под полным напряжением $U_{BC}=220$ В и ток этой фазы $I_{BC}=27$ А. Две другие фазы соединены последовательно, и поэтому

$$I_{CA}=I_{AB}=\frac{U_{BC}}{z_{CA}+z_{AB}}=\frac{220}{13,4+8,15}=10,2 \text{ А};$$

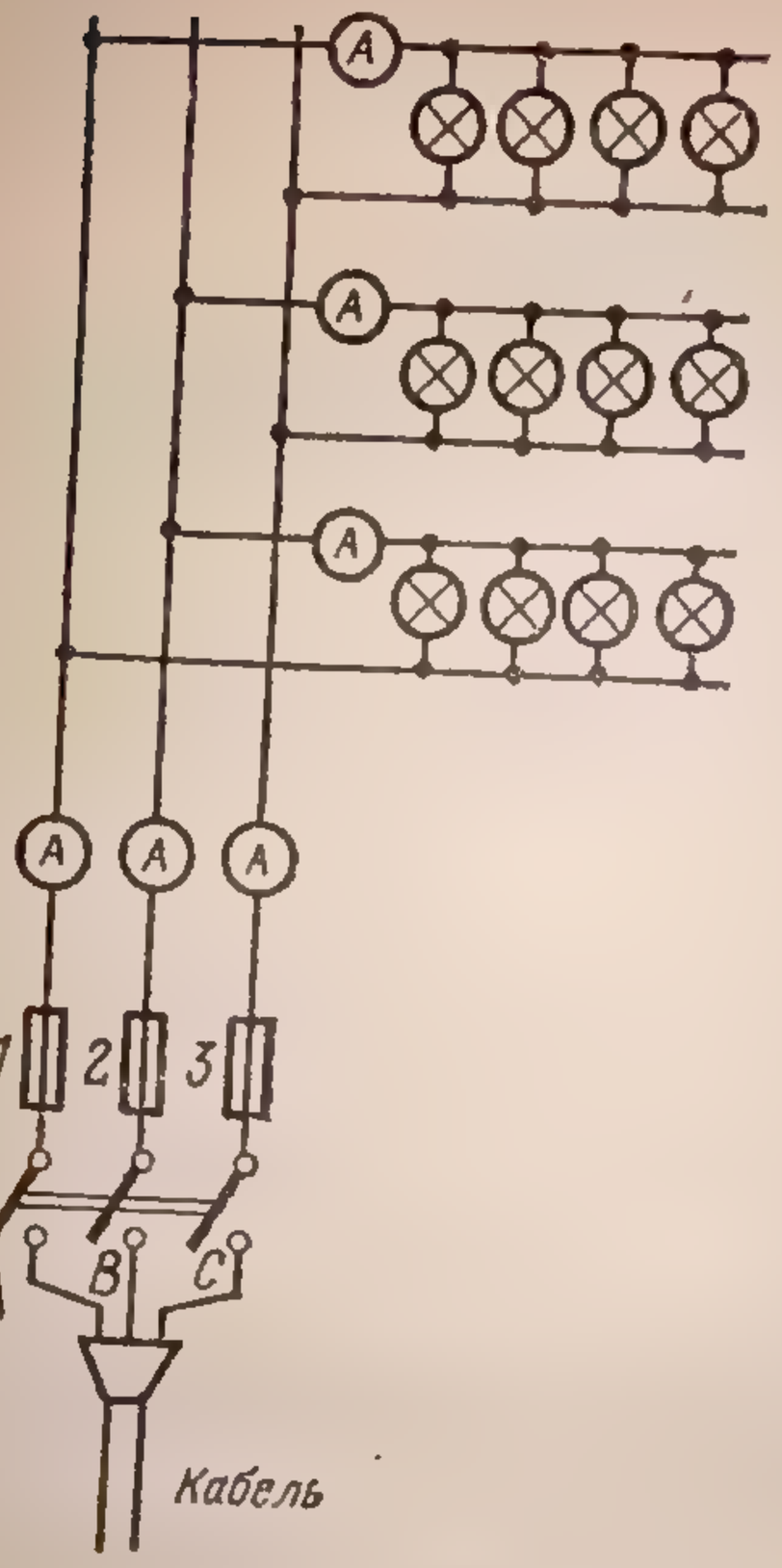


Рис. 8-17. К задаче 8-10.

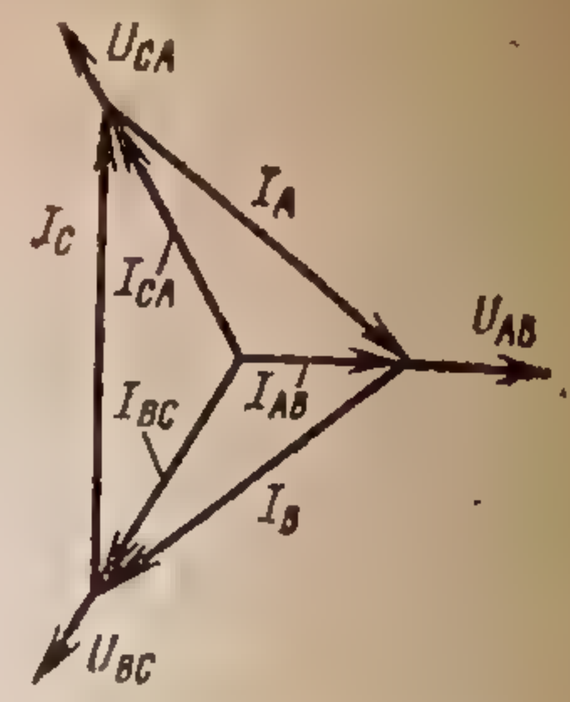


Рис. 8-18. К задаче 8-10.

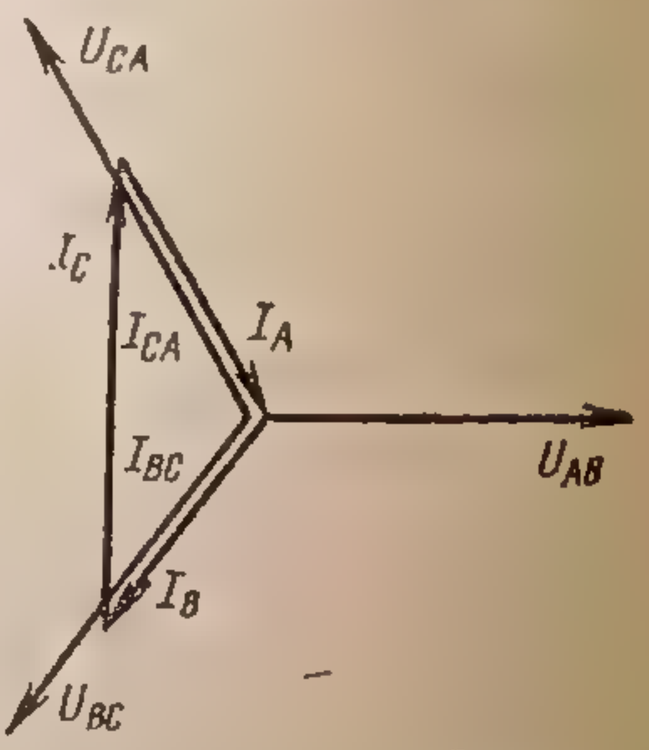


Рис. 8-19. К задаче 8-10.

Напряжение U_{BC} распределится между последовательно соединенными фазами пропорционально их сопротивлениям, т. е. $U_{CA}=I_{CA}z_{CA}=10,2\cdot 8,15=83,3$ В и $U_{AB}=I_{AB}z_{AB}=10,2\cdot 13,4=136,7$ В.

Так как расчет ведется при активной нагрузке, линейные токи определятся как арифметическая сумма токов в параллельных ветвях: $I_B=I_C=I_{BC}+I_{CA}=27+10,2=37,2$ А.

Условие 3. Определить напряжения ламп каждого этажа и токи в жилах кабеля при отключении одной из групп ламп (выключенных лампах).

Анализ и решение

Линейный ток равен геометрической разности двух фазных токов. Вектор линейного тока соединяет концы векторов фазных то-

жат проведенных из одной точки, и направлен к уменьшаемому. При отключении группы ламп, например, первого этажа ($I_{AB}=0$) $I_A=\bar{I}_{AB}-\bar{I}_{CA}=-\bar{I}_{CA}$; $\bar{I}_B=\bar{I}_{BC}-\bar{I}_{AB}=\bar{I}_{BC}$; $\bar{I}_C=\bar{I}_{CA}-\bar{I}_{BC}$. Соответствующее построение произведено на рис. 8-19.

При нормальной работе токи были определены в решении задачи по условию 1. Воспользовавшись этими данными, получим для данного случая: $I_{AB}=0$; $I_{BC}=I_{CA}=27$ А; $I_A=27$ А; $I_B=27$ А; $I_C=46{,}7$ А; $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=220$ В.

Вопросы и упражнения к задачам 8-9, 8-10

1. На табличке трехфазного электродвигателя указано, что он может работать при напряжении 380/220 В. Какими должны быть соединения обмоток двигателя при линейных напряжениях 380 и 220 В, чтобы мощность, к. п. д. и cos φ остались без изменения?

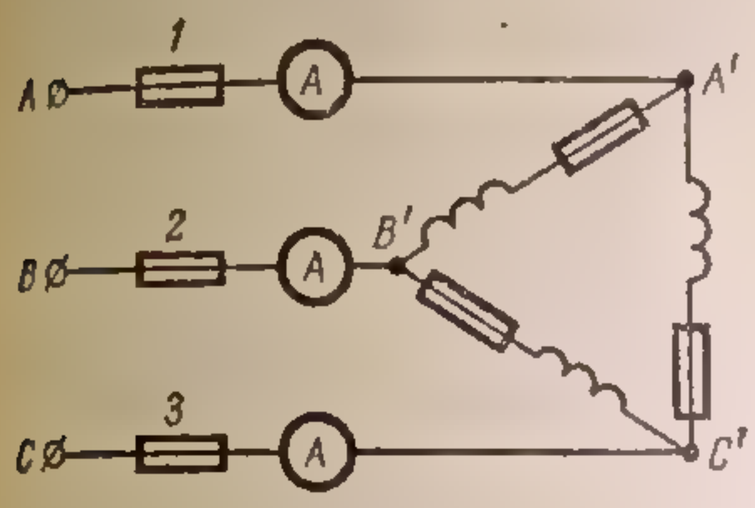


Рис. 8-20. К задаче 8-10.

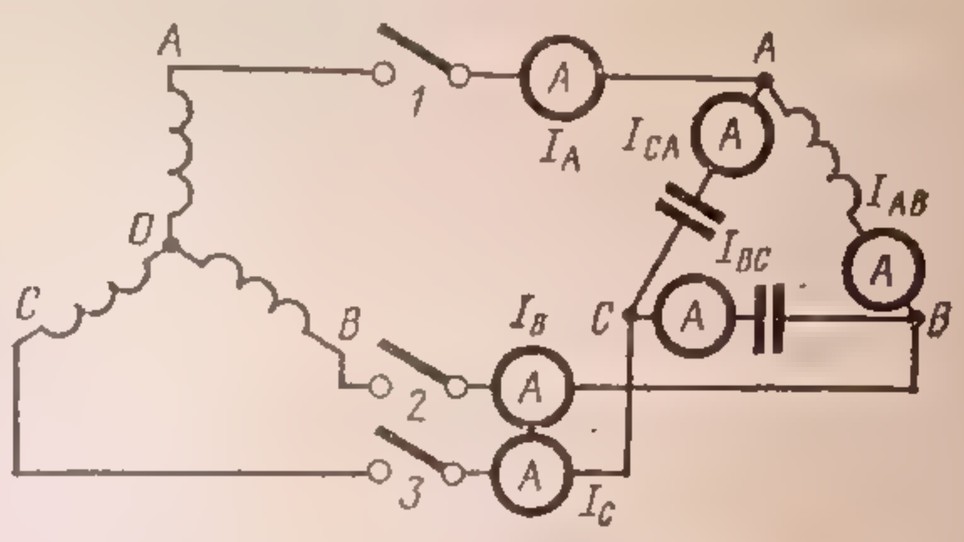


Рис. 8-21. К задаче 8-10.

Определить фазные и линейные токи двигателя при напряжениях сети 380 и 220 В и соответственных соединениях обмоток, а также потребляемую двигателем мощность, если мощность двигателя на валу 7 кВт, к. п. д. $\eta=0{,}85$ и $\cos\varphi=0{,}8$.

2. Трехфазная индукционная печь при соединении ее фаз в звезду потребляет от сети с линейным напряжением $U_л=220$ В мощность $P_Y=2{,}66$ кВт при $\cos\varphi=0{,}7$. Определить:

а) как изменятся ток в каждой фазе печи, ток в подводящих проводах и мощность печи, если пересоединить ее со звезды на треугольник;

б) полное, активное и реактивное сопротивления каждой фазы печи. Как нужно было бы одинаково изменить указанные сопротивления, чтобы при соединении фаз в треугольник мощность печи, линейные токи и cos φ остались без изменения?

3. В рассечку проводов трехфазной цепи (рис. 8-20) включены три амперметра, показания которых при равномерной нагрузке равны по 26 А; мощность электроприемника, соединенного в треугольник, $P=2400$ Вт. Определить потребляемую мощность и показания амперметров при 1) перегорании предохранителя в фазе $A'B'$; 2) перегорании предохранителя в линейном проводе AA'.

4. К генератору, соединенному в звезду, с фазными напряжениями $U_Ф=127$ В присоединены электроприемники, соединенные в треугольник (рис. 8-21), которые имеют следующие сопротивления: $r_{AB}=r_{BC}=r_{CA}=0$; $x_{AB}=22$ Ом; $x_{BC}=x_{CA}=11$ Ом.

Определить фазные и линейные токи, построить векторную диаграмму при замкнутых рубильниках *1—3*.

5. По условию предыдущей задачи определить, при размыкании какого из рубильников *1—3* показания приборов будут: $I_{AB}=I_{BC}=I_{AC}=17{,}3$ А; $I_A=I_B=I_C=0$.

8-11. Решить задачу 8-10 для условий 1—3 по данным, представленным в следующей таблице:

№ п/п.	P_{AB}, Вт	P_{BC}, Вт	P_{CA}, Вт
1	1200	6000	7200
2	6000	7200	1000
3	8000	6000	12 000

8-12. К трехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_л=120$ В включены соединенные в треугольник электроприемники (рис. 8-22), имеющие сопротивления $r_{AB}=6{,}67$ Ом; $r_{BC}=r_{CA}=10$ Ом; $x_{AB}=0$; $x_{BC}=x_{CA}=5{,}77$ Ом.

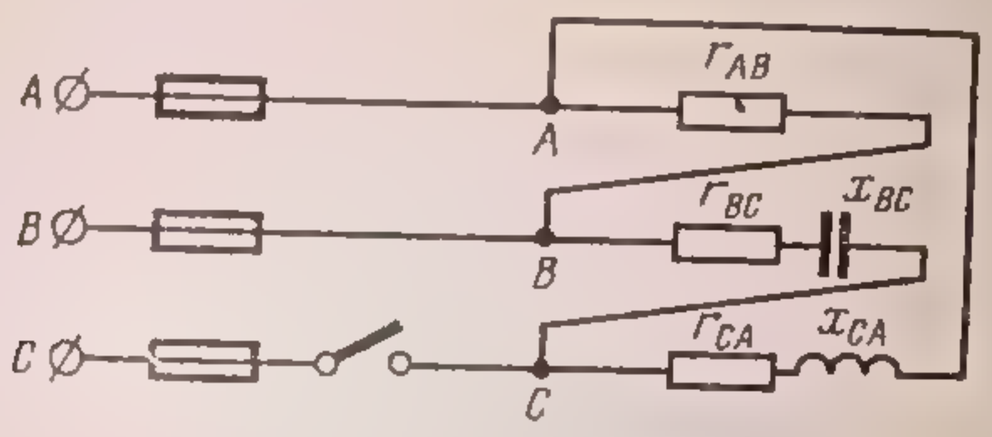


Рис. 8-22. К задаче 8-12.

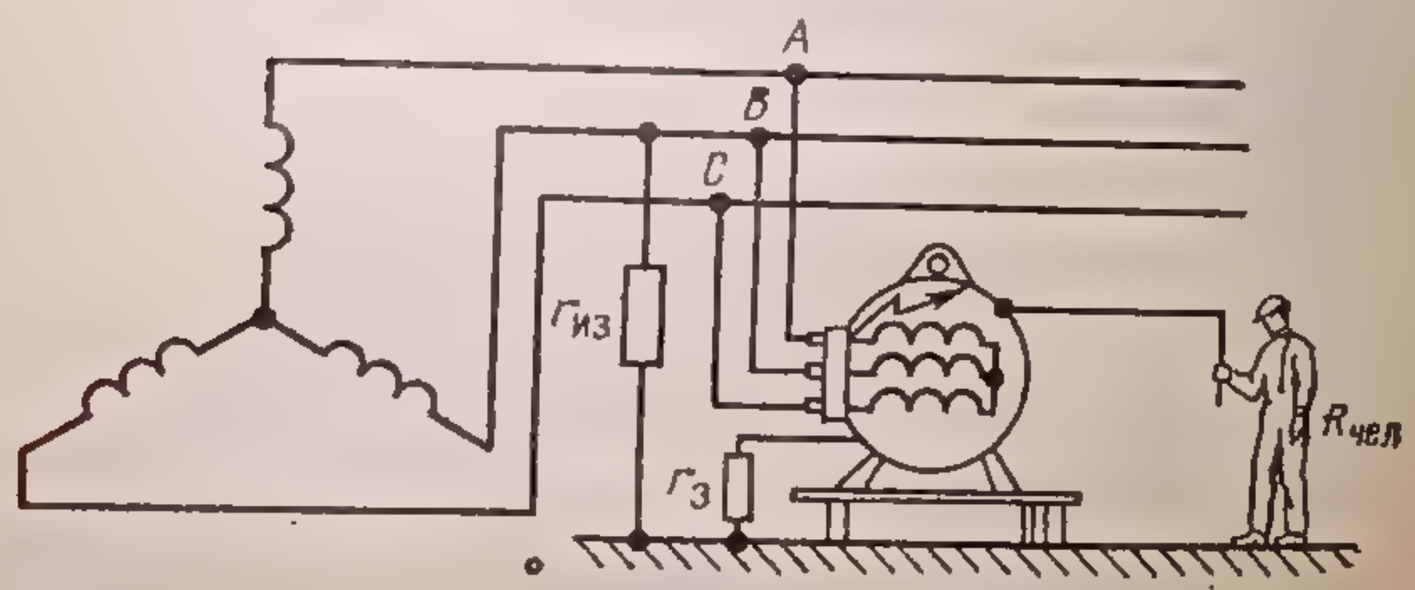


Рис. 8-23. К задаче 8-13.

Определить фазные и линейные токи, построить векторные диаграммы и определить активную и реактивную мощности цепи при замкнутом и разомкнутом рубильнике в цепи линейного провода *C*.

8-13. Сопротивление тела человека, включая сопротивление обуви и переходное сопротивление от подошвы обуви к земле, $R_{чел}=50\cdot10^3$ Ом. Сопротивление между корпусом двигателя и землей $r_з$ (сопротивление заземления). Напряжение сети $U=3000$ В.

Изоляция фазы *A* двигателя пробита на корпус, как показано на схеме рис. 8-23. Емкостной проводимостью проводов относительно земли пренебречь.

Условие 1. Для двух значений сопротивления заземления $r_{з1}=10^6$ Ом и $r_{з2}=1$ Ом определить напряжение, под которое по-

падет человек, прикоснувшись к корпусу двигателя, если, кроме пробоя на корпус изоляции фазы A, повреждена изоляция провода B трехфазной линии, причем сопротивление изоляции этого провода относительно земли составляет $r_{из}=1000$ Ом. Определить также ток, проходящий через тело человека, для обоих значений $r_з$.

Условие 2. При сопротивлении заземления $r_з=1$ Ом определить, при каком сопротивлении человека проходящий через него ток составит 0,05 А, т. е. может оказаться опасным для жизни?

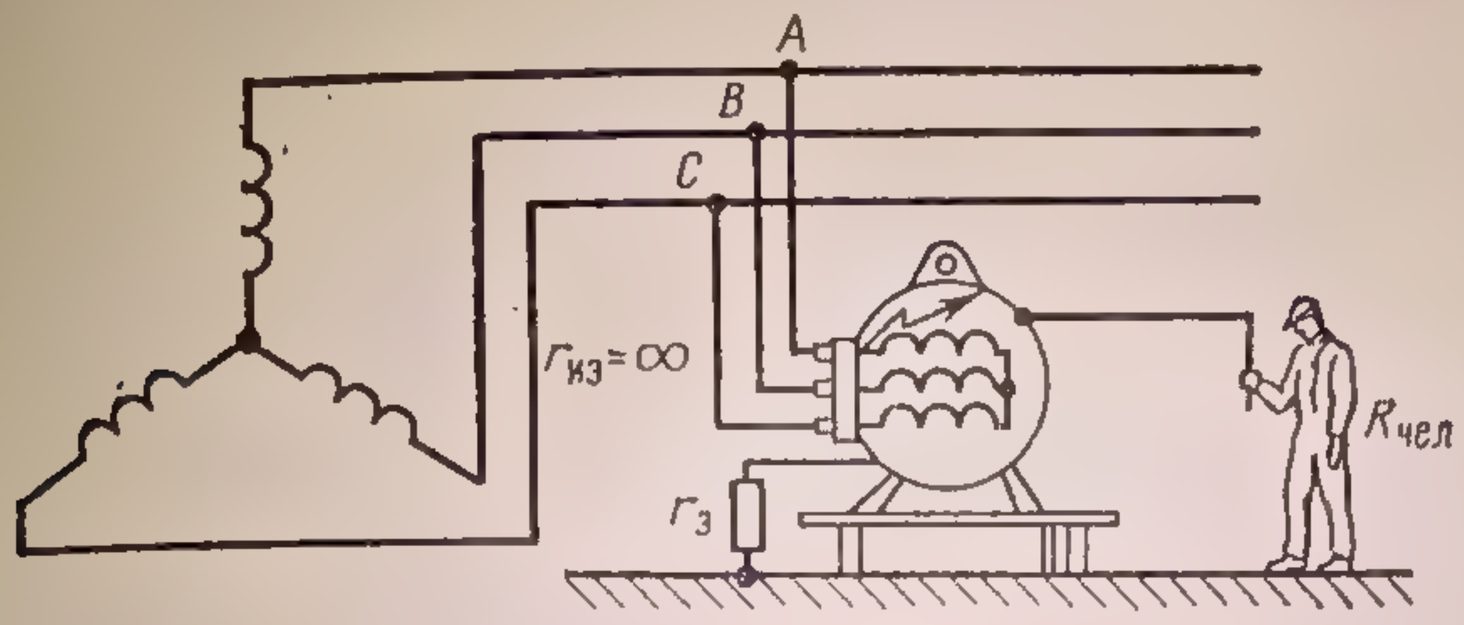


Рис. 8-24. К задаче 8-13.

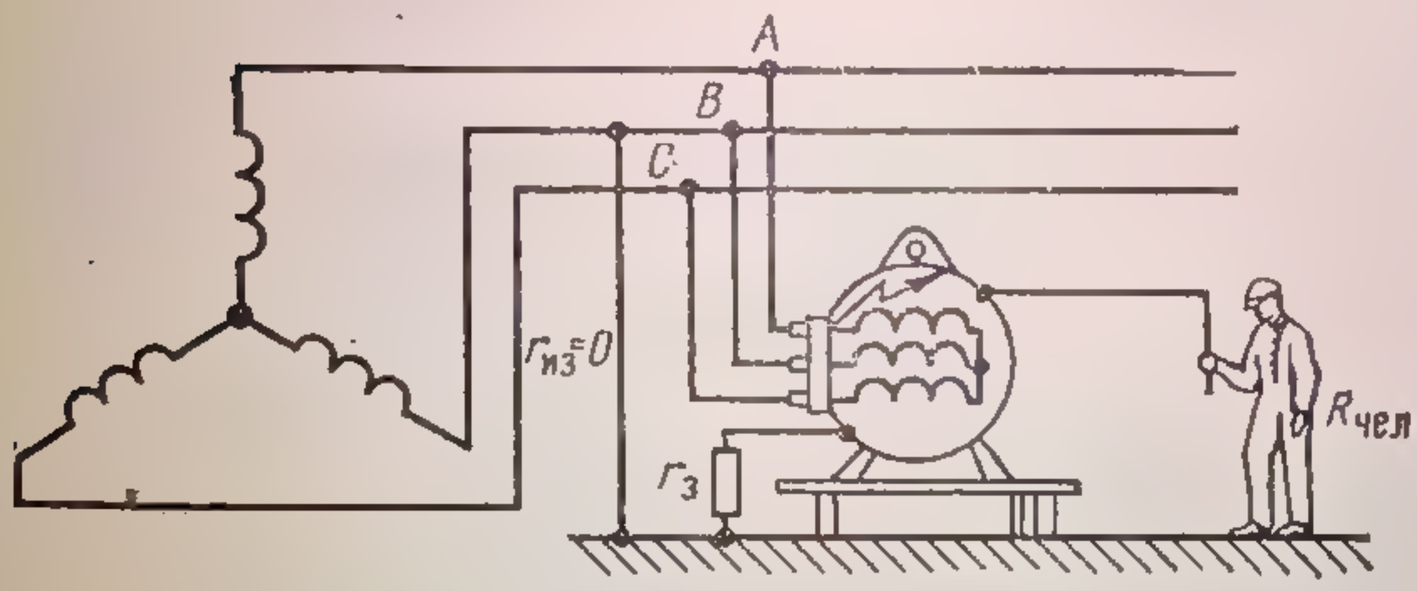


Рис. 8-25. К задаче 8-13.

Условие 3. Определить напряжение прикосновения человека к корпусу машины при пробое на корпус изоляции фазы A двигателя, если все линейные провода трехфазной сети идеально изолированы от земли: $r_{из}=\infty$ (рис. 8-24).

Условие 4. Определить напряжение прикосновения человека к корпусу машины при пробое на корпус изоляции фазы A двигателя, а также ток, который пройдет через тело человека, если линейный провод B получит глухое соединение с землей ($r_{из}=0$) (рис. 8-25) для двух случаев: сопротивление заземления $r_{з1}=10^6$ Ом и $r_{з2}=1$ Ом.

8-14. Трехфазный электродвигатель работает при напряжении 220 В. Номинальная мощность двигателя на валу 10 кВт; к. п. д. 0,85 и $\cos\varphi=0{,}8$.

Считая реактивную мощность двигателя постоянной и не зависящей от нагрузки, определить линейный ток и $\cos\varphi_1$ двигателя, если фактическая нагрузка соответствует мощности на валу 4 кВт. Коэффициент полезного действия двигателя в условиях недогрузки принять равным 0,7. Задачу решить при напряжениях в сети 380 и 220 В и соответственных соединениях обмоток.

Указание. Сначала следует определить реактивную мощность двигателя при полной нагрузке и $\cos\varphi=0{,}8$ по формуле $Q_{P'}=\sqrt{3}\,U_л I_л \sin\varphi$. Затем по данным задачи следует определить мощность P, потребляемую двигателем из сети в условиях недогрузки. Активная и реактивная мощности недогруженного двигателя выразятся: $P'=\sqrt{3}\,U_л I_л \cos\varphi_1$; $Q=\sqrt{3}\,U_л I_л \sin\varphi_1$, где $I_{л1}$ и φ_1 — соответственно линейный ток и угол сдвига фаз между фазными токами и напряжением для недогруженного двигателя. Решая эти два уравнения совместно, получаем требуемые результаты.

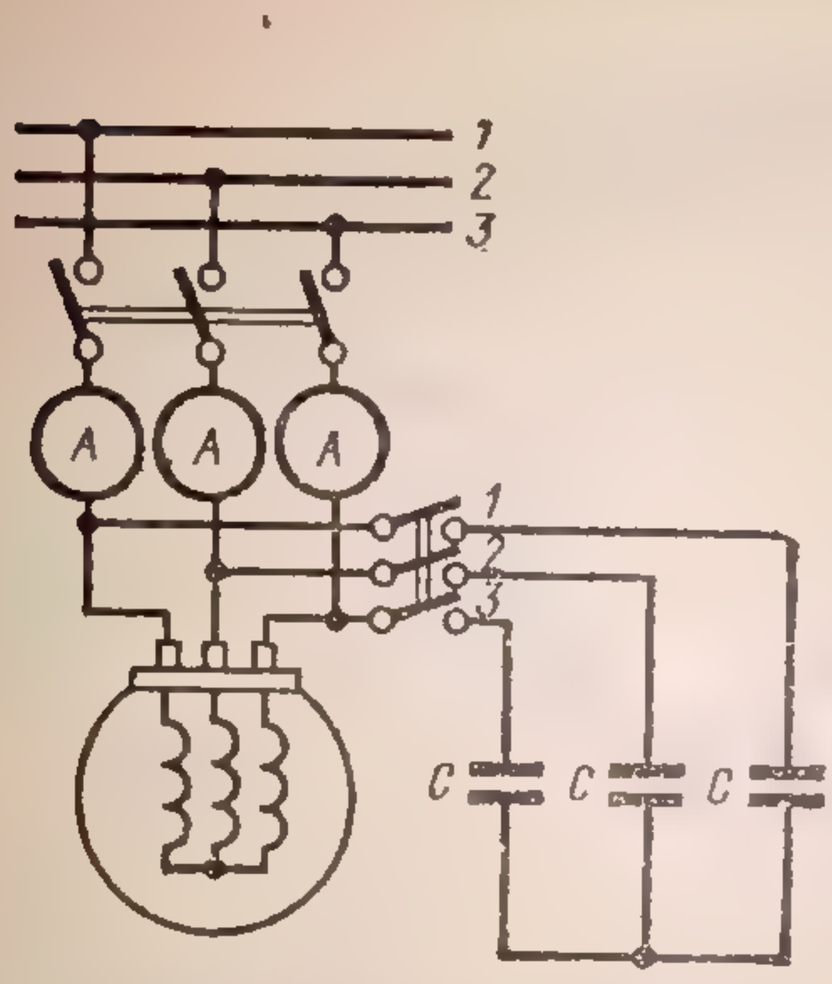


Рис. 8-26. К задаче 8-15

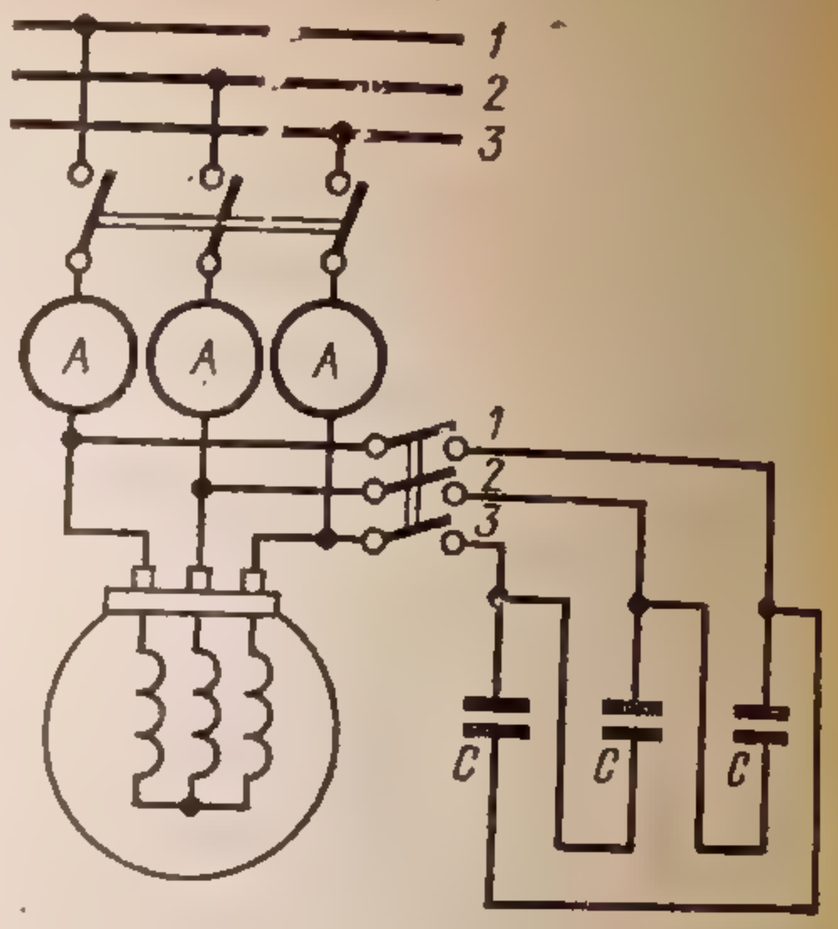


Рис. 8-27. К задаче 8-16.

8-15. В трехфазную сеть с линейным напряжением $U_л=220$ В включен двигатель, обмотки которого соединены в звезду (рис. 8-26). Ток в цепи питания двигателя $I_л=50$ А при $\cos\varphi=0{,}6$. Для повышения $\cos\varphi$ установки (с целью уменьшения линейного тока) параллельно к выводам двигателя включается батарея конденсаторов, соединенных в звезду. Определить емкость каждой фазы конденсаторов, линейный ток в питающей сети и реактивную мощность всей батареи при условии повышения $\cos\varphi$ установки до 1, когда ток становится минимальным. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Указание. Предварительно нужно построить векторную диаграмму и из нее убедиться, что для полной компенсации $\cos\varphi$ нужно, чтобы линейный емкостный ток конденсаторов — ток $I_{лс}$ был равен и противоположен по фазе реактивной слагающей тока двигателя $I_{л.дв}\sin\varphi$.

8-16. Решить предыдущую задачу для соединения батарей конденсаторов в треугольник (рис. 8-27). Какими будут линейный ток в сети и $\cos\varphi$ установки, если батарею конденсаторов данной задачи пересоединить в звезду?

Указание. Для соединения батареи конденсаторов в треугольник векторная диаграмма представлена на рис. 8-28. Как видно из диаграммы, для полной компенсации $\cos\varphi$ нужно, чтобы линейный

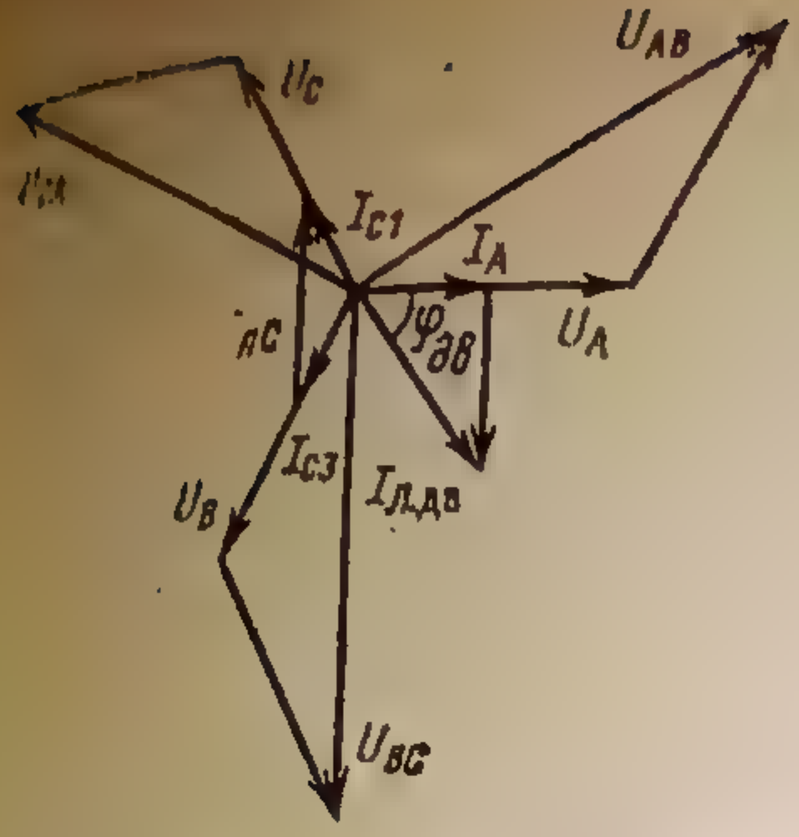
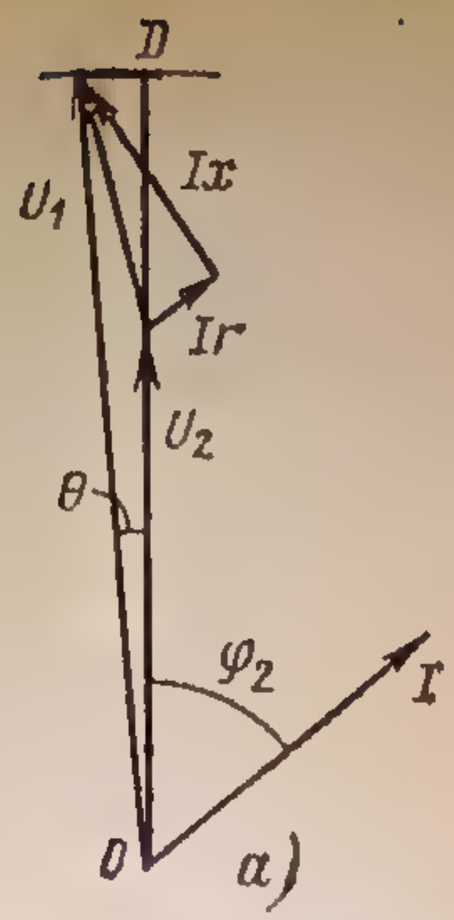


Рис. 8-28. К задаче 8-16.



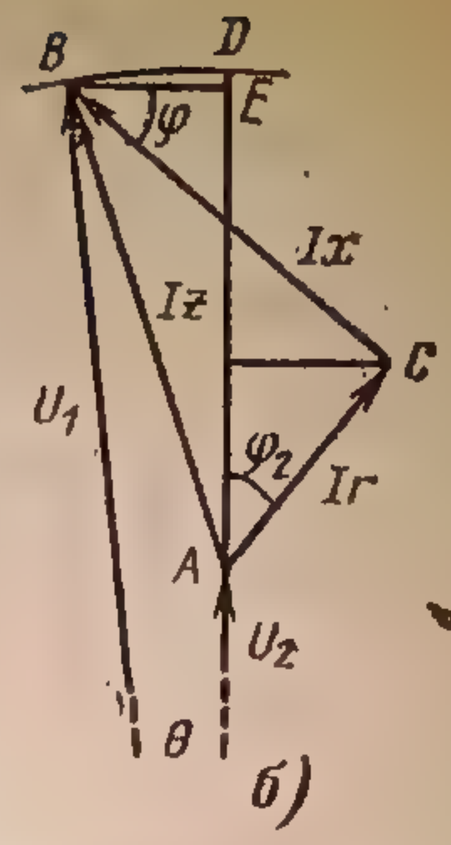


Рис. 8-29. К задаче 8-17.

ток компенсатора $I_{л\,c}$ был равен реактивной слагающей тока двигателя $I_{л.дв} \sin\varphi = 50 \cdot 0{,}8 = 40$ А. Фазный ток компенсатора

$$I_{C1} = I_{C2} = 40/\sqrt{3} = 23{,}1 \text{ А}.$$

8-3. ПАДЕНИЕ И ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ПО ПОТЕРЕ НАПРЯЖЕНИЯ

8-17*. В конце воздушной линии длиной $l = 2$ км и с сечением медных проводов $S = 50$ мм^2 присоединен потребитель мощностью $P_2 = 10$ кВт, имеющей $\cos\varphi_2 = 0{,}8$. Реактивное сопротивление индуктивности линии может быть принято 0,2 Ом/км. Построить векторную диаграмму и определить из нее, каким должно быть линейное напряжение в начале линии U_1, чтобы получить линейное напряжение в конце линии у потребителя $U_2 = 380$ В.

Условие 1. Линия двухпроводная, однофазная.

Анализ и решение

Векторная диаграмма для однофазной линии представлена на рис. 8-29, *а* и *б*. На рис. 8-29, *б* треугольник падений напряжения показан в увеличенном масштабе. Как следует из векторной диаграммы, потеря напряжения (арифметическая разность напряжений U_1 и U_2) выражается отрезком AD (из точки O радиусом, равным длине вектора U_1, сделана засечка на продолжении вектора U_2). Вследствие малости угла θ обычно заменяют отрезок AD отрезком AE, равным проекции вектора падения напряжения Iz на продолжение вектора U_2. Тогда потеря напряжения в двух проводах линии получится равной:

$$\Delta U = 2\,(Ir\cos\varphi_2 + Ix\sin\varphi_2).$$

Ток в линии выразится:

$$I = \frac{P_2}{U_2\cos\varphi_2} = \frac{10\,000}{380 \cdot 0{,}8} = 33 \text{ А}.$$

Активное сопротивление одного провода линии

$$r = \frac{l}{\gamma S} = \frac{2000}{57 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 0{,}7 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление линии, отнесенное к одному проводу,

$$x = 0{,}2 \cdot 2 = 0{,}4 \text{ Ом}.$$

Подставляя полученные значения величин в формулу для потери напряжения, получаем:

$$\Delta U = 2\,(33 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8 + 33 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}6) = 52{,}8 = 53 \text{ В},$$

отсюда

$$U_1 = U_2 + \Delta U = 380 + 53 = 433 \text{ В}.$$

Условие 2. Линия трехпроводная, трехфазная.

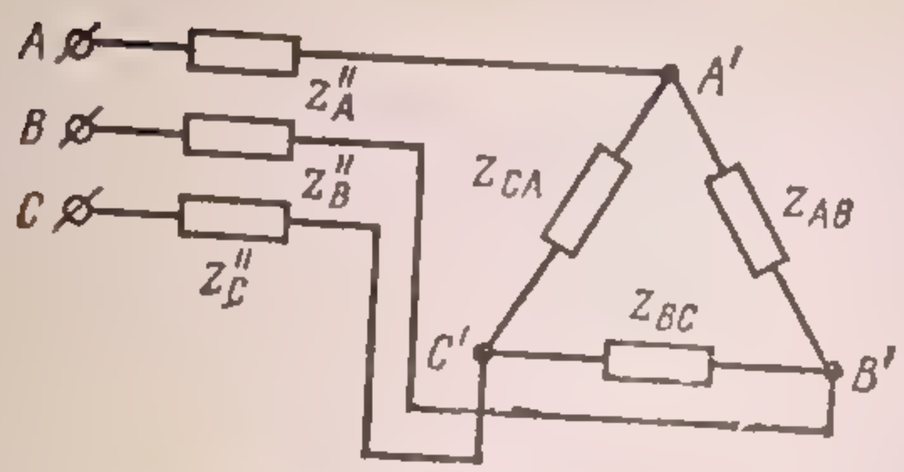


Рис. 8-30. К задаче 8-18.

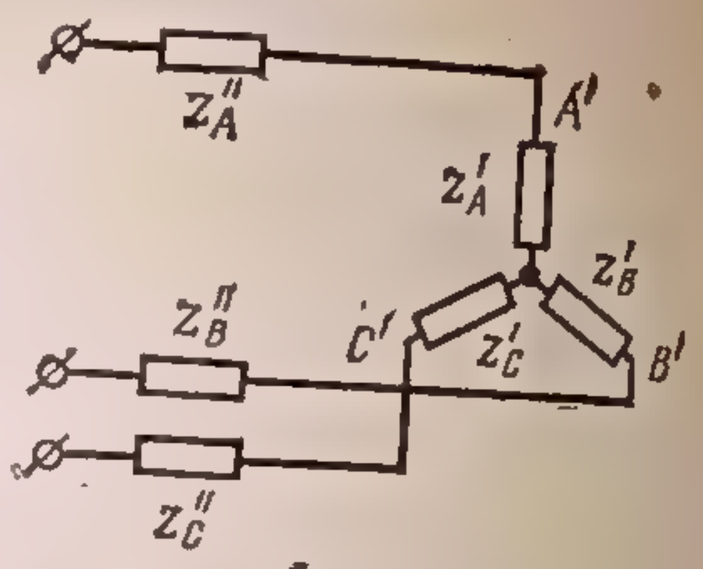


Рис. 8-31. К задаче 8-18.

Анализ и решение

Векторная диаграмма для однофазной линии, представленная на рис. 8-29, является в то же время векторной диаграммой фазных напряжений для соединения потребителя в звезду. Соотношение между линейными напряжениями можно получить, если умножить длины всех векторов напряжений на $\sqrt{3}$.

Тогда, как это следует из векторной диаграммы (см. решение задачи по условию 1), потеря напряжения в трехфазной сети (арифметическая разность линейных напряжений в начале и в конце линии) выразится:

$$\Delta U = \sqrt{3}\,(Ir\cos\varphi_2 + Ix\sin\varphi_2).$$

Полученное выражение справедливо также для соединения потребителя в треугольник, так как такое соединение всегда может быть заменено соединением в эквивалентную звезду.

Ток в линии определится:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,U_2\cos\varphi_2} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}\cdot 380 \cdot 0{,}8} = 19 \text{ А};$$

Подставляя в формулу для потери напряжения ток I и найденные в решении задачи по условию 1 значения сопротивлений r и X, получаем:

$$\Delta U = \sqrt{3}\,(19 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8 + 19 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}6) = 26{,}3 \text{ В},$$

откуда

$$U_1 = U_2 + \Delta U = 380 + 26 = 406 \text{ В}.$$

8-18*. В конце трехфазной линии, обладающей активным сопротивлением проводов по 2 Ом и реактивным по 1 Ом, включен соединенный в треугольник электроприемник (рис. 8-30), каждая фаза которого имеет активное сопротивление $r_ф = 18$ Ом и реактивное сопротивление индуктивности $x_ф = 15$ Ом. Определить фазные и линейные токи, линейные напряжения потребителя, если линейные напряжения в начале линии симметричны и равны по 220 В.

Анализ и решение

Наиболее простым способом решения задачи является замена треугольника эквивалентной звездой (см. решение задачи 8-9). Произведя такую замену, получим следующие сопротивления фаз потребителя:

$$r'_Y = r_\Delta / 3 = 18/3 = 6 \text{ Ом}; \quad x'_Y = x_\Delta / 3 = 15/3 = 5 \text{ Ом}.$$

Теперь фазы электроприемника соединены последовательно с соответствующими линейными проводами (рис. 8-31), и полные сопротивления фаз выразятся:

$$r_Y = r'_Y + r''_Y = 6 + 2 = 8 \text{ Ом}; \quad x_Y = x'_Y + x''_Y = 5 + 1 = 6 \text{ Ом};$$

$$z_Y = \sqrt{r_Y^2 + x_Y^2} = 10 \text{ Ом}.$$

Фазные и линейные токи получатся:

$$I_{ФY} = I_{лY} = I_{л\Delta} = U_{ФY} / z_Y = 127/10 = 12{,}7 \text{ А};$$

$$I_{Ф\Delta} = I_{л\Delta} / \sqrt{3} = 12{,}7/\sqrt{3} = 7{,}35 \text{ А};$$

$$z_\Delta = \sqrt{r_\Delta^2 + x_\Delta^2} = \sqrt{18^2 + 15^2} = 23{,}4 \text{ Ом}.$$

И, наконец, фазные напряжения электроприемника

$$U_{Ф\Delta} = U_{л\Delta} = I_{Ф\Delta} z_{Ф\Delta} = 7{,}35 \cdot 23{,}4 = 172 \text{ В}.$$

Таким образом, потеря напряжения составляет:

$$\Delta U = 220 - 172 = 48 \text{ В}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 8-17 и 8-18

1. В конце воздушной линии из медных проводов присоединен потребитель мощностью 200 кВт при напряжении 6000 В и $\cos \varphi_2 = 0{,}8$. Длина линии 5 км, активное сопротивление одного провода 4 Ом, реактивное 2 Ом. Определить расчетное сечение проводов, потерю напряжения в проводах и напряжение в начале линии для двух случаев: а) линия однофазная; б) линия трехфазная.

2. Как изменится решение предыдущего примера, если реактивное сопротивление линии равно нулю?

3. В условиях задачи 8-18 (рис. 8-30) определить фазные и линейные токи, линейные напряжения в начале линии, если линейные напряжения электроприемника симметричны и равны 220 В.

8-19. Для питания сварочного трансформатора, имеющего номинальный ток $I_н = 61{,}5$ А при $\cos\varphi = 0{,}7$, проложена двухпроводная линия длиной $l = 250$ м. Напряжение у выводов трансформатора $U_1 = 380$ В. Определить необходимое сечение медных проводов линии, если потеря напряжения в ней не должна превышать 3% U_1, и выбрать подходящее стандартное сечение. Индуктивностью линии пренебречь.

8-20. От трансформаторной подстанции напряжением $U_1 = 3300$ В отходит трехфазная линия из медных проводов сечением 50 мм², длиной 10 км с реактивным сопротивлением 0,4 Ом/км, нагруженная током 33 А.

Построить векторную диаграмму и определить напряжение в конце этой линии.

Определить также потерю напряжения ΔU в процентах и к. п. д. передачи.

Задачу решить для двух значений коэффициентов мощности потребителя: $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ и $\cos\varphi_2 = 1$.

8-21. По трехфазному кабелю длиной 1000 м нужно передать потребителю мощность 75 кВт при напряжении на вводе 500 В. Пренебрегая индуктивностью, определить необходимое сечение медной жилы кабеля, чтобы потеря напряжения не превышала $\Delta U_{\%} = 5$. Определить также мощность потерь в линии ΔP в процентах переданной потребителю мощности P_2 и напряжение в начале линии U_1. Задачу решить для двух значений коэффициентов мощности потребителя: $\cos\varphi = 0{,}8$ и $\cos\varphi_2 = 1$.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ЦЕПИ СО СТАЛЬЮ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

9-1. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАЛЬЮ. РЕАКТОРЫ

9-1*. Реактор длиной $l_к = 20$ см, площадью поперечного сечения $S = 100$ см², с числом витков $w = 1000$ присоединен к сети переменного тока напряжением $U = 111$ В при частоте $f = 50$ Гц (рис. 9-1, *а*). В реактор вставляется магнитопровод, набранный из тонких листов стали марки Ст2 (рис. 9-1, *б*). Пренебрегая активным сопротивлением реактора и потерями в стали, построить векторную диаграмму

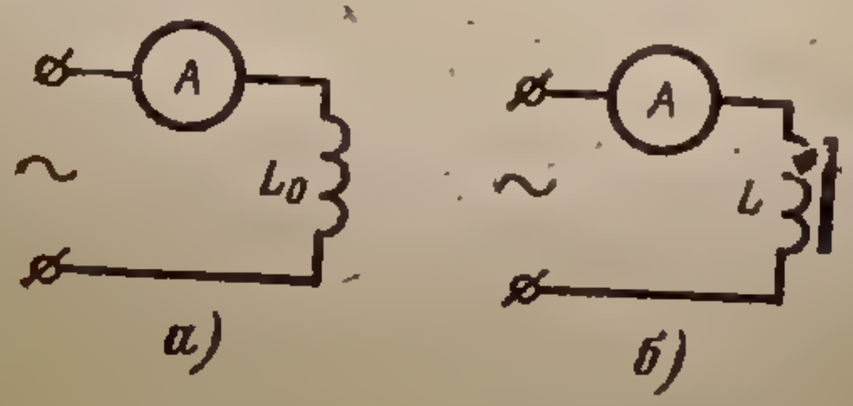


Рис. 9-1. К задаче 9-1.

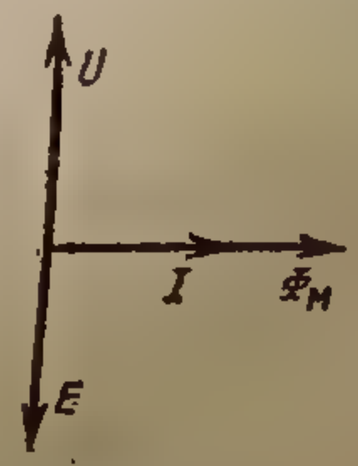


Рис. 9-2. К задаче 9-1.

для реактора без магнитопровода и при вставленном магнитопроводе. Определить для обоих случаев магнитный поток, индуктивность и реактивное сопротивление реактора, а также относительную магнитную проницаемость стали.

Анализ и решение

Векторная диаграмма для реактора без магнитопровода и при вставленном магнитопроводе будет иметь один и тот же вид (рис. 9-2).

Индуктивность реактора без магнитопровода зависит от размеров реактора и магнитной проницаемости среды и может быть определена из выражения

$$L_0 = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{l_к} = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Г/м} \cdot 10^6 \cdot 0{,}01\ \text{м}^2}{0{,}2\ \text{м}} = 0{,}0627\ \text{Г}.$$

Реактивное сопротивление реактора $x_{L0} = \omega L_0 = 314 \cdot 0{,}0627 = 19{,}7$ Ом. Ток реактора $I = U/xL_0 = 111/19{,}7 = 5{,}64$ А.

Из определения индуктивности следует $L_0 = \omega\Phi/i$, где Φ и i — мгновенные значения потока и тока. При постоянной индуктивности поток и ток пропорциональны, поэтому можно написать $L_0 = \omega\Phi_м/I_м$. Отсюда

$$\Phi_м = \frac{L_0 I_м}{\omega} = \frac{0{,}0627 \cdot 5{,}64\sqrt{2}}{1000} = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{Вб}.$$

При наличии стального магнитопровода магнитная проницаемость среды и индуктивность реактора неизвестны, они становятся переменными величинами. Поэтому для определения тока в реакторе нельзя пользоваться реактивным сопротивлением индуктивности. Здесь нужно исходить из того, что при малом активном сопротивлении приложенное напряжение уравновешивается э. д. с. индуктированной в реакторе, $U_м = E_м = \omega\Phi_м\omega$ (см. решение задачи 5-1, условие 2). Заменяя $\omega = 2\pi f$ и учитывая, что $U = E = E_м/\sqrt{2}$, получаем $U = E = 4{,}44\, f\Phi_м\omega$. Из этого выражения следует, что при неизменном максимальном напряжении максимальный магнитный поток тоже должен оставаться постоянным, т. е. он не зависит от того, вставлен ли в реактор стальной магнитопровод или нет. Поэтому при вставленном стальном магнитопроводе $\Phi_м = 5\ 10^{-4}$ Вб. Действительно, $U = 4{,}44\, f\Phi_м\omega = 4{,}44\ 50\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 = 111$ В. Максимальная индукция в магнитопроводе $B_м = \Phi_м/S = 5 \cdot 10^{-4}/10^{-2} = 0{,}05$ Т.

Соответствующая этой индукции максимальная напряженность поля для мягкой кованой стали (приложение 7) $H_м = 40$ А/м. Но $H_м = I_м\omega/l_к$.

Отсюда находим

$$I_м = \frac{H_м\, l_к}{\omega} = \frac{40 \cdot 0{,}2}{1000} = 0{,}008\ \text{А} = 8\ \text{мА}.$$

Действующее значение тока

$$I = I_м/\sqrt{2} = 8/\sqrt{2} = 5{,}67\ \text{мА}.$$

Индуктивность реактора при данном токе:

$$L = \frac{\omega \Phi_м}{I_м} \frac{1000 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{0{,}008} = 62{,}5 \text{ Г},$$

а реактивное сопротивление

$$x_L = \omega L = 314 \cdot 62{,}5 = 19\,700 \text{ Ом}.$$

Относительная магнитная проницаемость стали

$$\mu = \frac{B_м}{\mu_0 H_м} = \frac{0{,}05}{1{,}256 \cdot 10^6 \cdot 0{,}4 \cdot 10^2} = 1000.$$

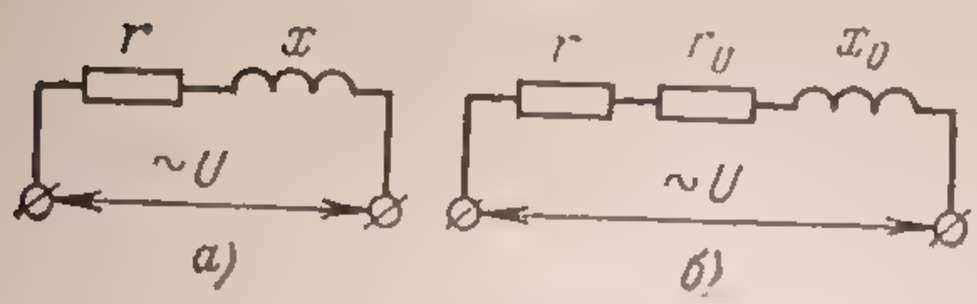


Рис. 9-3. К задаче 9-2.

9-2*. Схемы замещения реактора без стального магнитопровода и со стальным магнитопроводом представлены на рис. 9-3, *а* и *б*.

На схеме рис. 9-3, *а* r и x — соответственно активное и реактивное сопротивления реактора.

На схеме рис. 9-3, *б* r — активное сопротивление проволоки реактора; r_0 — активное сопротивление, обусловленное активной мощностью, расходуемой на нагревание стали от гистерезиса и вихревых токов; x_0 — эквивалентное реактивное сопротивление реактора. Применительно к схемам замещения построить в общем виде векторные диаграммы для реактора без стального магнитопровода и со стальным магнитопроводом.

Анализ и решение

Векторная диаграмма для реактора без стального магнитопровода представлена на рис. 9-4.

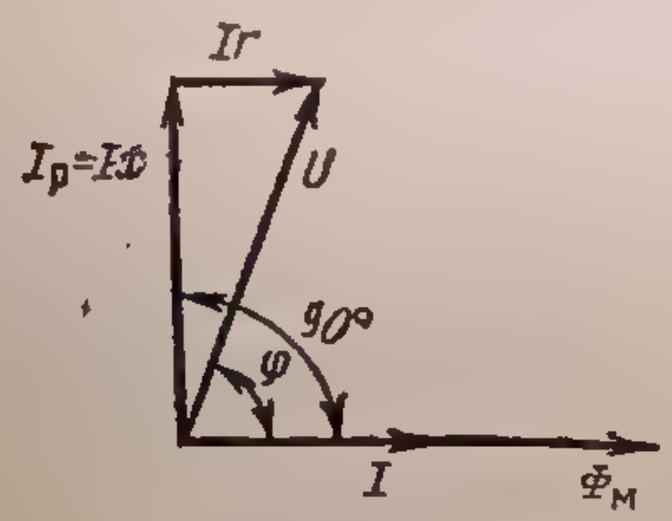


Рис. 9-4. К задачам 9-2, 9-4.

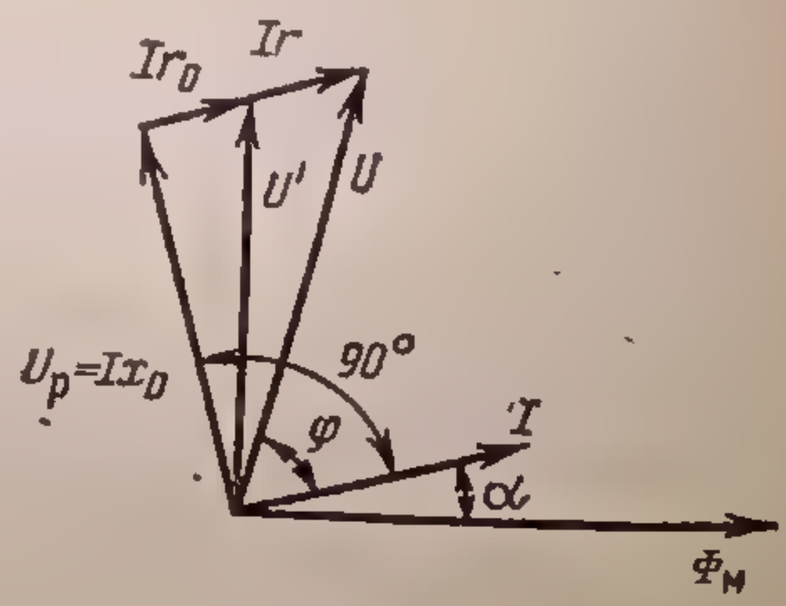


Рис. 9-5. К задаче 9-2.

Векторная диаграмма для реактора со стальным магнитопроводом представлена на рис. 9-5. В этом случае вектор тока вследствие гистерезиса опережает по фазе вектор магнитного потока на угол α (гистерезисный угол); U' — составляющая напряжения, уравновешивающая э. д. с., индуктированную в реакторе; Ir — активная составляющая напряжения реактора; Ir_0 — дополнительная активная со-

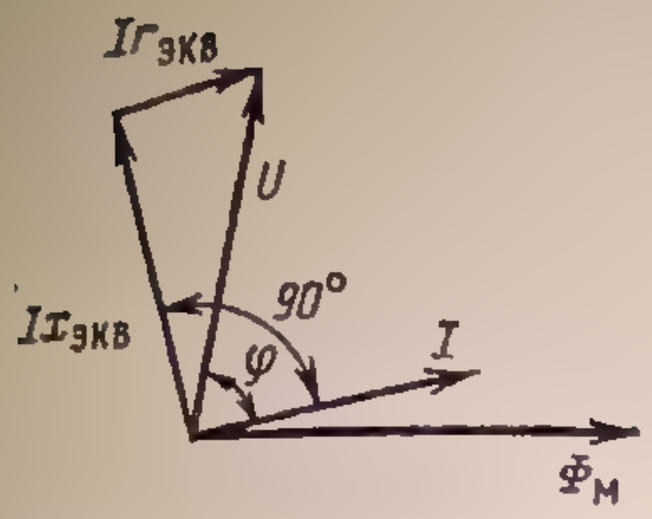


Рис. 9-6. К задаче 9-2.

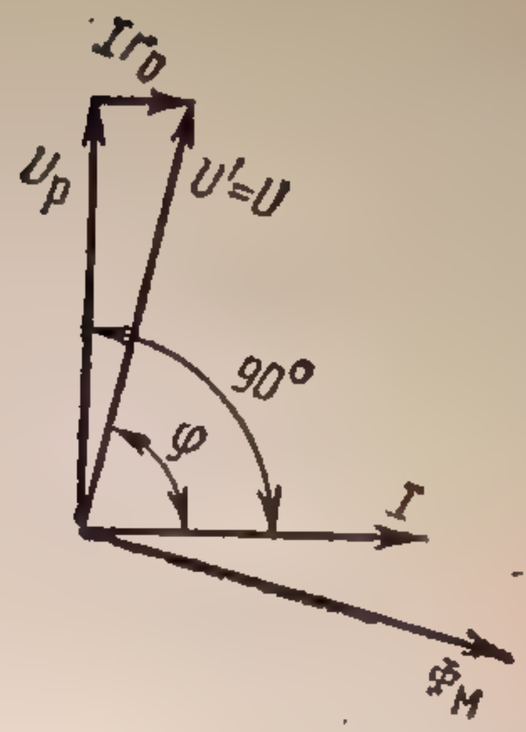


Рис. 9-7. К задачам 9-1, 9-2.

ставляющая напряжения, обусловленная потерей энергии в стали, и IX_0 — эквивалентная реактивная составляющая напряжения. Заменяя на схеме замещения (рис. 9-3, *б*) r и r_0 одним активным сопротивлением $r_{экв}=r+r_0$ и $x_{экв}=x_0$, мы придем к схеме замещения рис. 9-3, *а*, векторная диаграмма для которой с учетом гистерезиса в стали магнитопровода показана на рис. 9-6.

Вопросы и упражнения к задачам 9-1, 9-2

1. Как изменится решение задачи 9-1, если число витков реактора будет в 2 раза меньше?

2. Как изменится магнитный поток в реакторе, присоединенном к сети переменного тока напряжением U, если при неизменных прочих условиях число витков реактора увеличить вдвое? Активным сопротивлением реактора пренебречь.

3. К выводам реактора со стальным магнитопроводом приложено синусоидальное напряжение U. Ток реактора $I=10$ А. Построить векторную диаграмму, показать схему замещения и определить добавочное активное сопротивление реактора r_0, обусловленное потерями в стали, эквивалентное активное сопротивление $r_{экв}$, реактивное сопротивление реактора x_L при данном токе и э. д. с., индуктированную в реакторе, для следующих случаев:

а) активное сопротивление реактора ничтожно. Потерями в стали пренебречь;

б) мощность потерь в меди реактора $P_м=400$ Вт. Потерями в стали пренебречь;

в) активное сопротивление реактора ничтожно мало. Мощность потерь в стали $P_{ст}=400$ Вт;

г) мощности потерь в стали и в меди реактора одинаковы и равны по 400 Вт.

4. Для какого из четырех условий (пп. «а» — «г»), указанных в примере 3, векторная диаграмма будет иметь вид, показанный на рис. 9-2, 9-4, 9-5, 9-7.

9-3. Реактор сечением 42 см², длиной 14,1 см, обладающий ничтожным активным сопротивлением, присоединен к сети переменного тока с напряжением U и частотой $f=50$ Гц. Число витков реактора 400. Определить ток реактора, если а) материалом каркаса служит эбонит; б) в реактор введен магнитопровод из электротехнической стали марки 1512 (Э42); в) из электротехнической стали марки 1211 (Э11). Потерями энергии в стали пренебречь.

Условие 1. Приложенное напряжение $U=205$ В.

Условие 2. Приложенное напряжение $U=2\cdot205$ В (в 2 раза больше, чем по условию 1). Определить также, во сколько раз изменится ток в реакторе сравнительно с током по условию 1.

Указание. Из выражения $U=4{,}44\,f\Phi_м w$ следует определить магнитный поток, а затем максимальную индукцию. По характеристикам намагничивания (приложение 7) для указанных материалов магнитопровода легко определить изменение тока, учитывая, что индукция возрастает пропорционально приложенному напряжению.

Условие 3. Приложенное напряжение $U=3\cdot205$ В (в 3 раза больше, чем по условию 1). Определить также, во сколько раз изменится ток в реакторе сравнительно с током по условию 1.

Указание. То же, что и к условию 2.

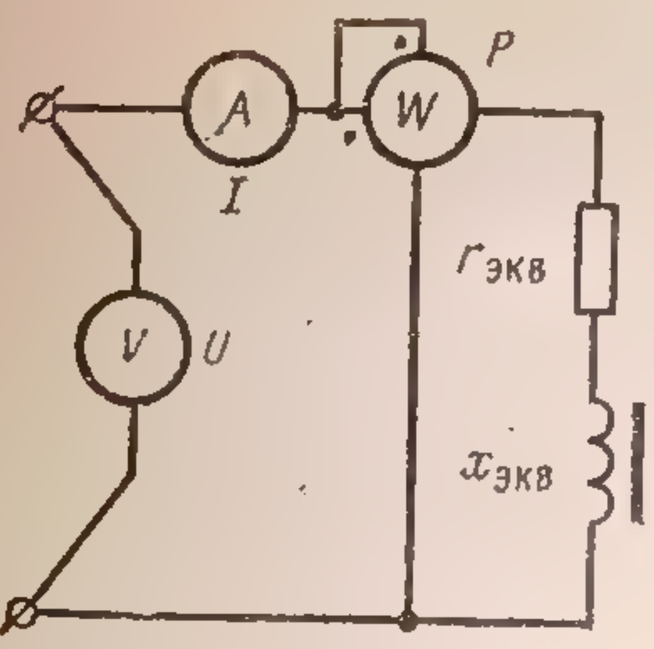


Рис. 9-8. К задачам 9-4, 9-6, 9-8.

9-4. Реактор, имеющий 500 витков, включается в сеть переменного тока напряжением 120 В и частотой 50 Гц. Показания амперметра и ваттметра (рис. 9-8): без магнитопровода $I_1=7$ А, $P_1=49$ Вт; при вставленном в реактор магнитопроводе из электротехнической стали, собранном из тонких, изолированных друг от друга пластин, $I_2=1{,}965$ А; $P_2=3{,}86$ Вт. Пренебрегая потерями в стали на гистерезис и вихревые токи, построить для обоих случаев векторные диаграммы и определить для тех же случаев активное сопротивление реактора, реактивное сопротивление, индуктированную в реакторе э. д. с., cos φ и максимальный магнитный поток.

9-5. Сердечник из электротехнической стали с ничтожной остаточной индукцией и собранный из тонких пластин вдвигается в реактор и служит для изменения индуктивности в цепи при сохранении активного сопротивления. При напряжении 220 В и полностью вставленном сердечнике ток реактора $I_1=2$ А, при частично выдвинутом сердечнике $I_2=8$ А; при полностью удаленном сердечнике $I_3=15$ А. Активное сопротивление реактора 10 Ом, частота сети 50 Гц. Потерями в стали пренебречь.

Условие 1. Построить векторную диаграмму и определить индуктивность реактора для указанных трех случаев положения сердечника.

Условие 2. Считая магнитную проницаемость для сердечника реактора постоянной в широких пределах изменения тока, определить, как изменится ток в указанном реакторе, если при том же приложенном напряжении а) частота вдвое уменьшится; б) частота равна нулю.

9-6. Реактор со стальным магнитопроводом, собранным для уменьшения потерь на вихревые токи из тонких, изолированных друг от друга листов, присоединен к сети переменного тока напряжением 142 В и частотой 50 Гц. Показания амперметра и ваттметра в цепи (рис. 9-8) 5,7 А и 106 Вт. Пренебрегая потерями энергии на вихревые токи и в активном сопротивлении реактора, построить векторную диаграмму напряжения, э. д. с., тока, магнитного потока и определить из нее намагничивающую составляющую тока I_μ и ак-

тивную составляющую $I_г$, обусловленную потерями на гистерезис. Определить также cos φ реактора.

9-7. Для реактора предыдущей задачи определить cos φ, показания амперметра и ваттметра в цепи, если дополнительная мощность, обусловленная потерями на вихревые токи, составляет 36 Вт. Построить векторную диаграмму и определить также и для этого случая намагничивающую составляющую тока $I_μ$ и активную составляющую тока $I_{ст}$, обусловленную потерями в стали на гистерезис и вихревые токи.

9-8. Амперметр, ваттметр и вольтметр, включенные в цепь реактора со стальным магнитопроводом (рис. 9-8), дают показания: $P=172$ Вт, $U=127$ В, $I=6$ А. Измеренное постоянным током сопротивление реактора $r=2$ Ом. Реактор имеет $w=200$ витков и питается от сети переменного тока с частотой $f=50$ Гц.

Построить векторную диаграмму и определить индуктированную в реакторе э. д. с. E, максимальный магнитный поток $Φ_м$, коэффициент мощности cos φ, мощность потерь в меди $P_м$, мощность потерь в стали $P_{ст}$, намагничивающую составляющую тока $I_μ$, составляющую тока, обусловленную потерями в стали $I_{ст}$.

9-2. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР. ХОЛОСТОЙ ХОД И РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

9-9*. Однофазный трансформатор для частоты 50 Гц имеет первичное напряжение $U_1=380$ В, вторичное $U_2=127$ В. Число витков первичной обмотки $w_1=400$. Магнитопровод трансформатора квад-

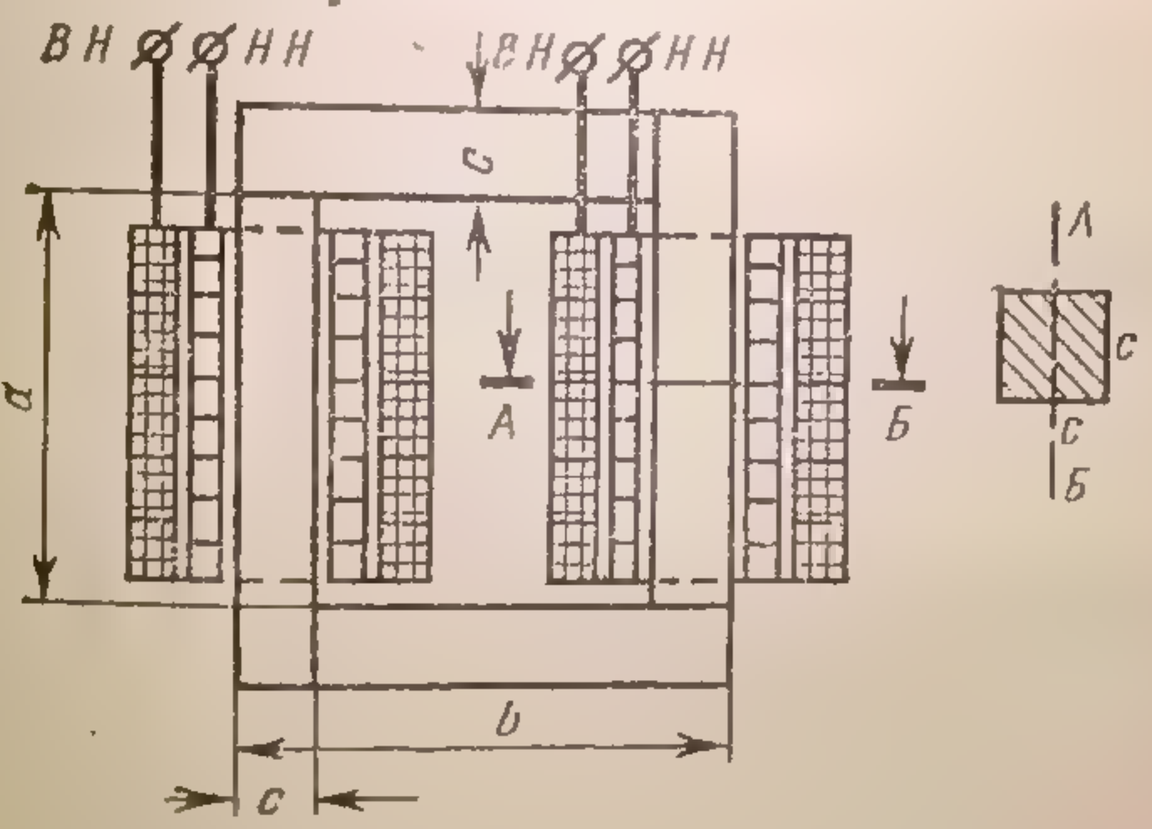


Рис. 9-9. К задачам 9-9, 9-12.

ратного сечения собран из листов электротехнической стали марки 1512 (Э42) толщиной $Δ=0{,}5$ мм, плотностью 7800 кг/м³ и имеет размеры a, b, c (рис. 9-9), причем 10% сечения занято изоляцией. Пренебрегая активным падением напряжения и рассеянием, определить ток холостого хода трансформатора, число витков вторичной обмотки w_2, коэффициент мощности cos φ и построить векторную диаграмму трансформатора при холостом ходе. Кривая удельных потерь в стали, отнесенных к 1 кг массы в зависимости от максимальной магнитной индукции при частоте 50 Гц и толщине листов 0,5 мм, приведена на рис. 9-10. Магнитным сопротивлением воздушных зазо-

ров в стыках стальных пакетов разъемного магнитопровода пренебречь. Размеры магнитопровода: $a=160$ мм, $b=160$ мм, $c=60$ мм.

Анализ и решение

Без учета активного падения напряжения и рассеяния векторная диаграмма будет иметь вид, как показано на рис. 9-11. При этом

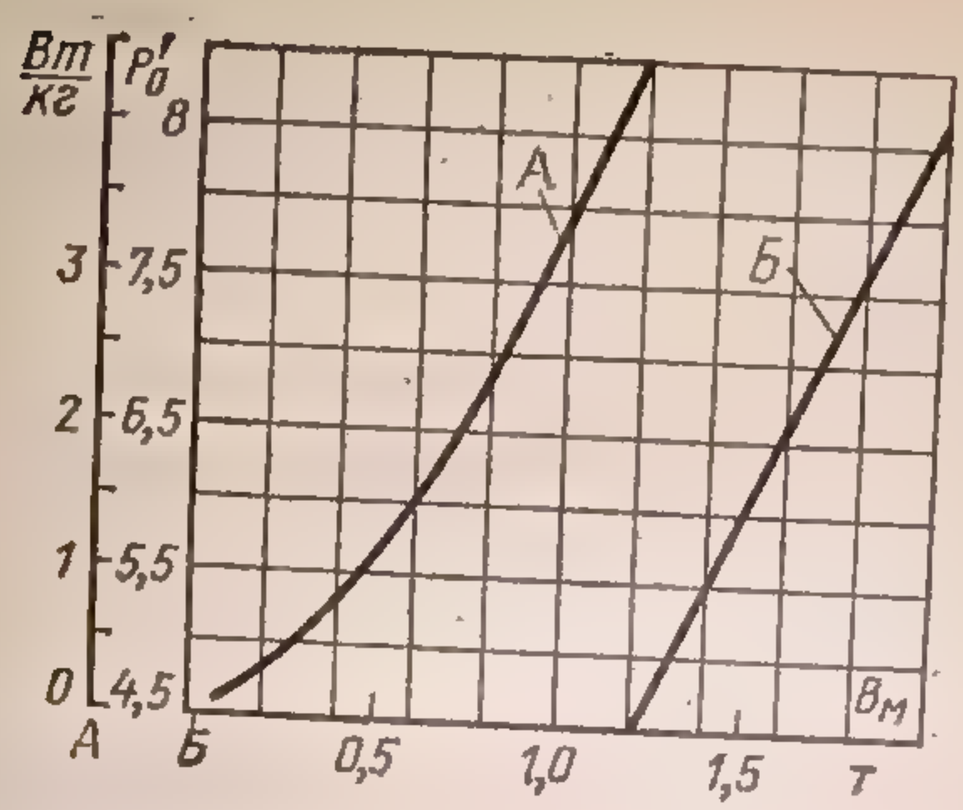


Рис. 9-10. К задачам 9-9, 9-10.

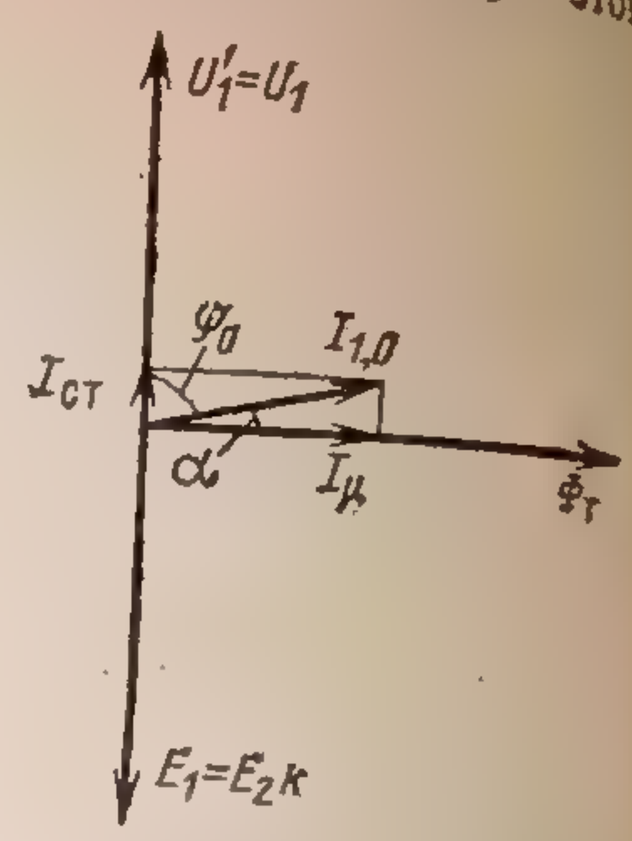


Рис. 9-11. К задаче 9-9.

можно считать, что приложенное напряжение равно э. д. с., т. е. $U_1=E_1=4{,}44f\Phi_м w$, откуда определяем $\Phi_м$:

$$\Phi_м=\frac{U_1}{4{,}44fw_1}=\frac{380}{4{,}44\cdot 50\cdot 400}=42{,}8\cdot 10^{-4}\text{ Вб}.$$

Максимальная индукция с учетом того, что 10% сечения занято изоляцией, определится:

$$B_м=\frac{\Phi_м}{0{,}9S_{серд}}=\frac{42{,}8\cdot 10^{-4}}{0{,}9\cdot 36\cdot 10^{-4}}=1{,}32\text{ Т}.$$

По характеристике намагничивания для данного сорта стали (приложение 7) находим для индукции $B_м=1{,}3$ Т $H_м=680$ А/м, для индукции 1,35 Т $H_м=1000$ А/м. В небольших пределах изменения индукции эти изменения можно считать пропорциональными изменениями напряженности поля. Поэтому путем интерполяции определяем:

$$B_м=\frac{1{,}3+1{,}35}{2}=1{,}325\text{ Т},$$

а соответствующая напряженность магнитного поля

$$H_м=\frac{680+1000}{2}=840\text{ А/м}.$$

Далее по уравнению закона полного тока для магнитной цепи имеем:

$$I_{\mu м}w_1=H_м l_{ср},$$

где $l_{ср}$ — средняя длина линии магнитного поля по магнитопроводу.

По рис. 9-9 находим, что $l_{ср}=64$ см. Тогда

$$I_{\mu м}=\frac{H_н l_{ср}}{w_1}=\frac{840\cdot 0{,}64}{400}=1{,}34 \text{ А},$$

Действующее значение намагничивающего тока

$$I_\mu=\frac{1{,}34}{\sqrt{2}}=0{,}95 \text{ А},$$

Масса стали

$$G=S_{ст} l_{ср} d_0=0{,}9\cdot 36\cdot 10^{-4}\cdot 0{,}64\cdot 7800=16{,}1 \text{ кг}.$$

По кривой удельных потерь (рис. 9-10) находим:

$$P_{ст.уд}=5{,}2 \text{ Вт/кг},$$

тогда

$$P_{ст}=5{,}2\cdot 16{,}1=83{,}7 \text{ Вт};$$

$$I_{ст}=P_{ст}/U'=83{,}7/380=0{,}22 \text{ А};$$

$$I_0=\sqrt{I_\mu^2+I_{ст}^2}=0{,}975 \text{ А};$$

$$\cos\varphi_0=\frac{P_{ст}}{U' I_0}=\frac{83{,}7}{380\cdot 0{,}975}=0{,}226;$$

$$\varphi_0=76°;\quad \alpha=14°.$$

Коэффициент трансформации определяется как отношение высшего напряжения к низшему при холостом ходе или как отношение чисел витков:

$$K=\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2}=\frac{380}{127}=3.$$

Отсюда находим число витков вторичной обмотки

$$w_2=w_1'/K=400/3=134.$$

9-10. Однофазный трансформатор 220/50 В имеет число витков в первичной обмотке $w_1=250$. Магнитопровод трансформатора (рис. 9-12) собран из листов трансформаторной стали марки 1512 (Э42) толщиной 0,5 мм, плотностью 7800 кг/м³ и длиной пакетов 100 см. Сечение магнитопровода квадратное и имеет размеры $6\times 6=36$ см², причем 10% сечения занято изоляцией.

Принимая активное сопротивление первичной обмотки равным 1 Ом и считая, что поток рассеяния [1] составляет 10% потока, прони-

[1] Магнитный поток рассеяния каждой обмотки трансформатора сцеплен только с витками данной обмотки и не участвует в трансформации напряжений. Поток рассеяния в основном замыкается через воздух и пропорционален току в соответствующей обмотке. Этот поток индуктирует в обмотке э. д. с. самоиндукции, что обусловливает, как и в реакторе, реактивное падение напряжения Ix, пропорциональное току и реактивному сопротивлению индуктивности обмотки трансформатора (без стального магнитопровода).

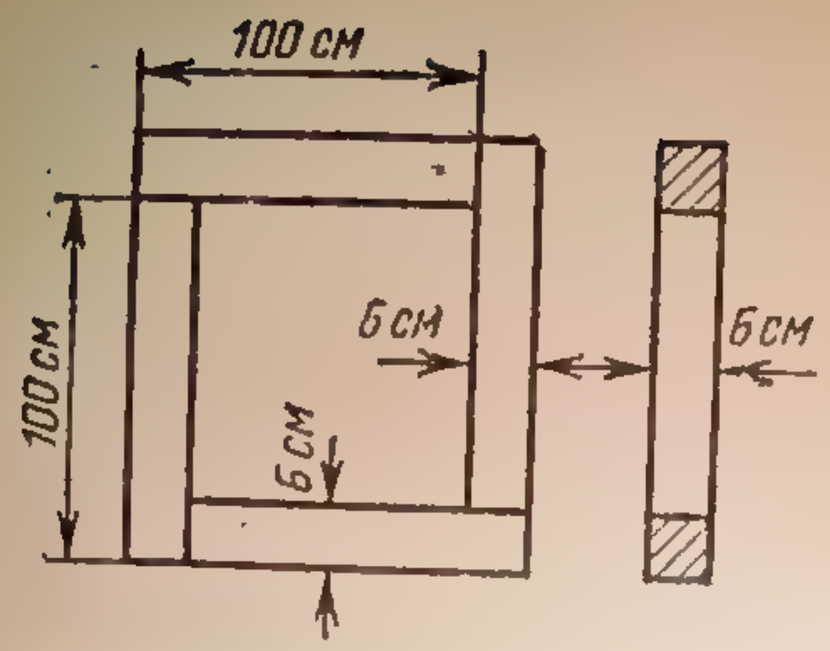


Рис. 9-12. К задаче 9-10.

зывающего первичную обмотку, можно определить ток холостого хода трансформатора, коэффициент мощности $\cos\varphi_0$ и построить векторную диаграмму трансформатора при холостом ходе. Для определения потерь в стали воспользоваться рис. 9-10.

Анализ и решение

Данный расчет можно вести только приближенно, так как для определения тока нужно знать магнитный поток, а для определения магнитного потока нужно определить слагающую напряжения, уравновешивающую э. д. с., которая в свою очередь зависит от тока.

Поэтому поступаем следующим образом. Допустим, что приложенное напряжение равно э. д. с., т. е. $U_1 = E_1 = 4{,}44\, f \Phi_м w_1$, откуда определяем $\Phi_м$

$$\Phi_м = \frac{U_1}{4{,}44 f w_1} = \frac{220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 250} = 39{,}7 \cdot 10^{-4}\ \text{Вб}.$$

Максимальная индукция с учетом того, что 10% сечения занято изоляцией, определится:

$$B_м = \frac{\Phi_м}{0{,}9 S_{серд}} = \frac{39{,}7 \cdot 10^{-4}}{0{,}9 \cdot 36 \cdot 10^{-4}} = 1{,}225\ \text{Т}.$$

По кривой намагничивания для данного сорта стали находим $H_м = 430$ А/м.

Далее по уравнению закона полного тока для магнитной цепи имеем $I_{\mu м} w_1 = H_м l_{ср}$, где $l_{ср} = 400$ см — средняя длина линии магнитного поля по магнитопроводу (рис. 9-12). Теперь

$$I_{\mu м} = \frac{430 \cdot 4}{250} = 6{,}9\ \text{А}.$$

Действующее значение намагничивающего тока

$$I_\mu = \frac{6{,}9}{\sqrt{2}} = 4{,}9\ \text{А}.$$

Масса стали

$$G = 0{,}9 \cdot 36 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 7800 = 101\ \text{кг}.$$

По кривой удельных потерь (рис. 9-10) находим:

$$P_{ст.уд} = 4{,}5\ \text{Вт/кг}; \quad P_{ст} = 4{,}5 \cdot 101 = 454\ \text{Вт};$$

$$I_{ст} = \frac{P_{ст}}{U'} = \frac{454}{220} = 2{,}06\ \text{А};$$

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{ст}^2} = 5{,}3\ \text{А};$$

$$\operatorname{tg}\alpha = I_{ст}/I_\mu = 2{,}06/4{,}9 = 0{,}42 \text{ и } \alpha = 22°50';$$

Теперь проверим, насколько мы ошиблись, приняв $E_1 = U_1$. По второму закону Кирхгофа для первичной обмотки трансформатора с учетом рассеяния можно написать $\overline{U}_1 + \overline{E}_1 + \overline{E}_{s1} = \overline{I}_0 r_1$; здесь U_1 — приложенное к первичной обмотке напряжение; E_1 — э. д. с., индуктированная в обмотке основным потоком, замыкающимся в магнитопроводе; E_{s1} — э. д. с., индуктированная в обмотке потоком рассеяния, замыкающимся в основном через воздух. Вектор э. д. с. E_1 отстает по фазе от основного потока на $^1/_4$ периода и определяется из выражения $E_1 = 4{,}44 f \Phi_м w_1$.

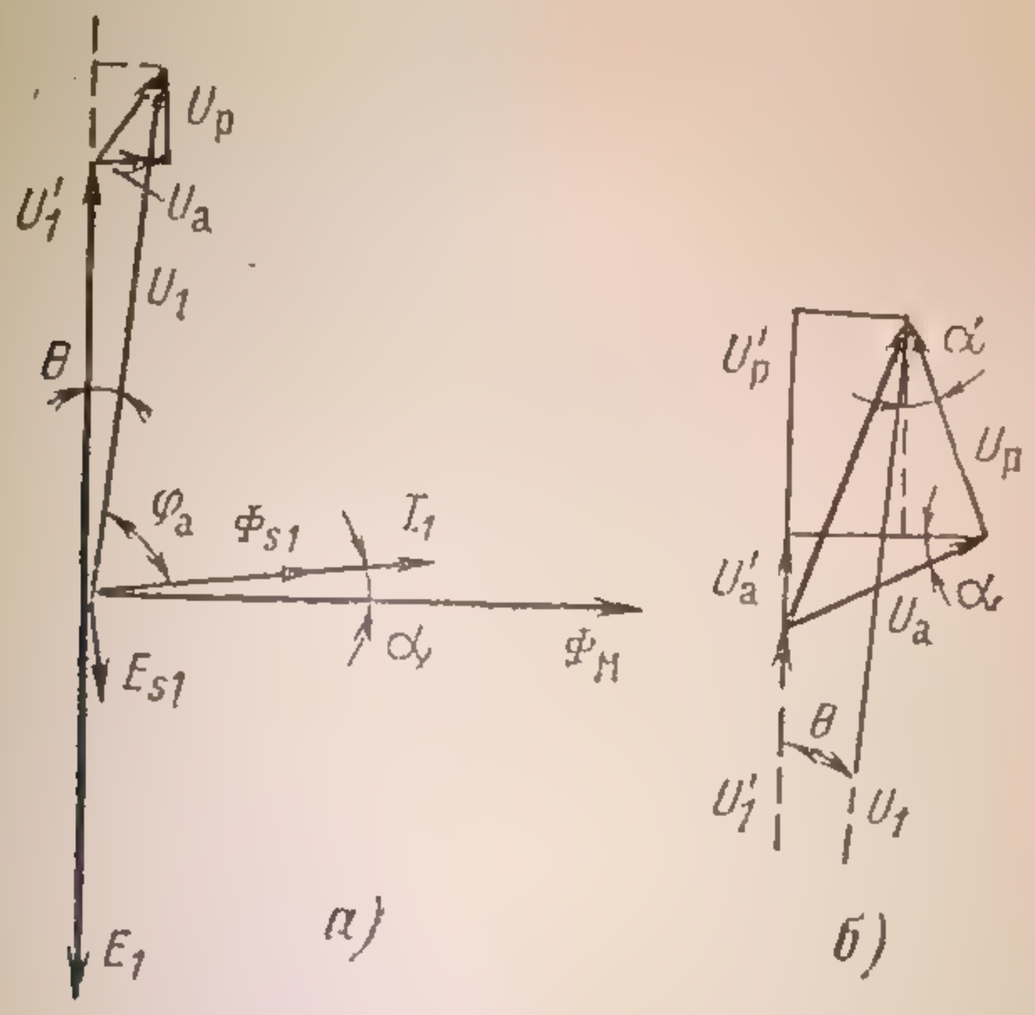


Рис. 9-13. К задаче 9-10.

Вектор э. д. с. E_{s1} отстает по фазе от потока рассеяния или от тока на $^1/_4$ периода, так как ток и поток рассеяния пропорциональны. Электродвижущая сила может быть выражена формулой $E_{s1} = I_0 x_1$, где $x_1 = \omega L_{s1}$ — реактивное сопротивление обмотки, обусловленное индуктивностью от потока рассеяния $\left(L_{s1} = \dfrac{w_1 \Phi_{s1}}{i_1}\right)$;

r_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

Из выражения, написанного по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки трансформатора, следует, что $U_1 = (-\overline{E}_1) + \overline{I}_0 r_1 + (-\overline{E}_{s1})$. Заменяя $(-E_1)$ через U_1', $(I_0 r_1)$ через U_a, $(-E_{s1})$ через $U_p = I_0 x_1$, получаем $\overline{U}_1 = \overline{U}_1' + \overline{U}_a + \overline{U}_p$.

Таким образом, приложенное напряжение U_1 состоит из трех составляющих (геометрическая сумма): составляющей U_1', уравновешивающей основную э. д. с. E_1; составляющей U_a, покрывающей активное падение напряжения в обмотке (вектор U_a совпадает по фазе с током); составляющей U_p, уравновешивающей э. д. с. рассеяния (вектор U_p противоположен вектору э. д. с. E_{s1}, т. е. опережает по фазе ток на $^1/_4$ периода). Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 9-13, *а* и *б*. Из векторной диаграммы (рис. 9-13, *б*) видно, что благодаря малости угла θ можно приближенно написать:

$U_1 \approx U_1' + U_a' + U_p'$ (арифметическая сумма), или

$$U_1 = U_1' + U_a \sin\alpha + U_p \cos\alpha.$$

Электродвижущая сила рассеяния, равная $U_р$, составляет 10% основной э. д. с. E_1, т. е. $U_р = E_{s1} = 0{,}1 \cdot 220 = 22$ В; $U_и = I_0 r_1 = 5{,}3 \cdot 1 = 5{,}3$ В; $U_1 = 220 + 2{,}06 + 20{,}03 = 242$ В вместо 220 В.

Считая, что в небольших пределах изменения напряжения э. д. с. пропорциональна ему, определим действительное значение $U_1' = E_1'$:

$$U_1' = 200 \frac{220}{242{,}06} = 200 \text{ В}.$$

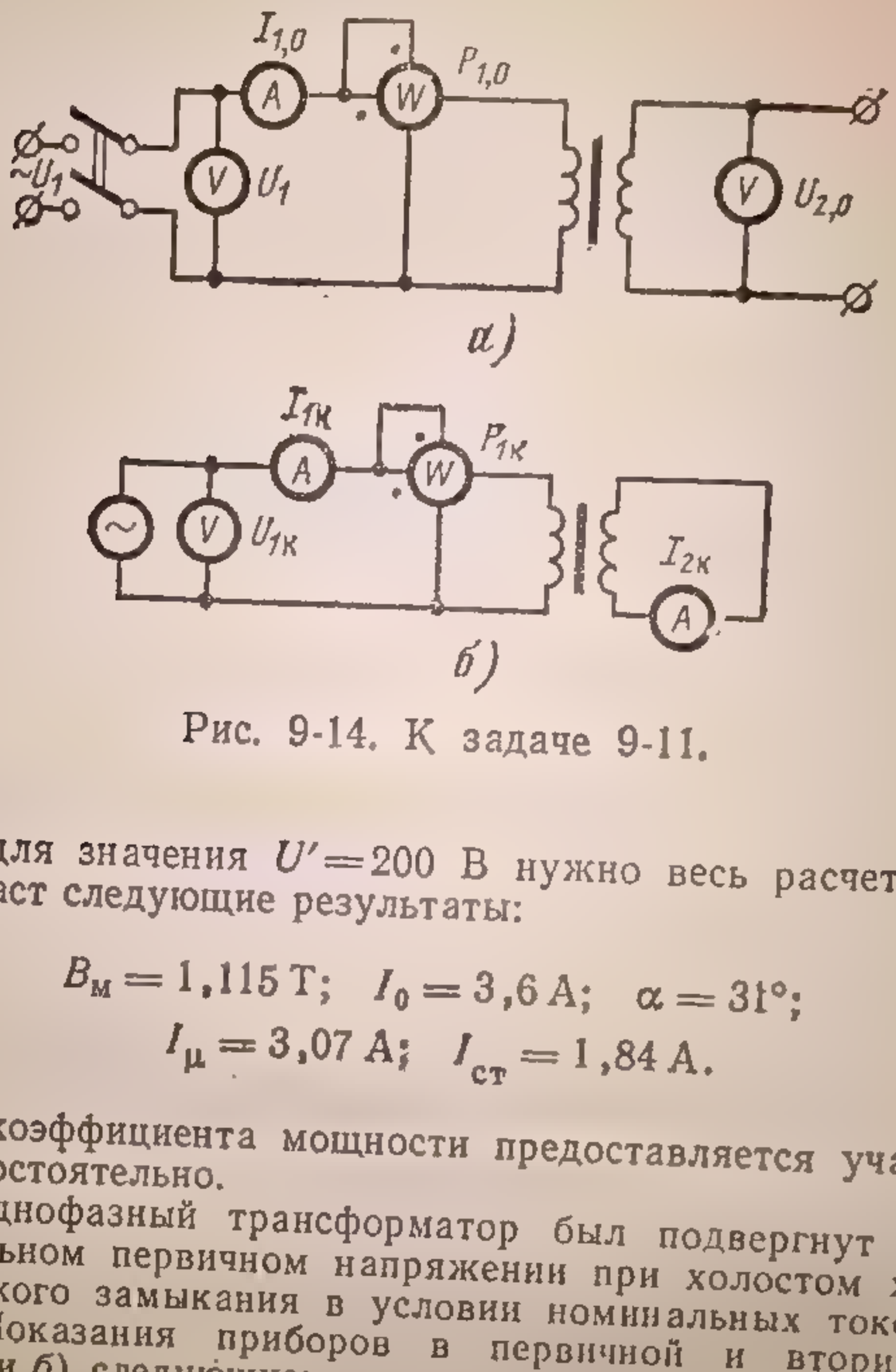


Рис. 9-14. К задаче 9-11.

Теперь для значения $U' = 200$ В нужно весь расчет произвести снова, что даст следующие результаты:

$$B_м = 1{,}115 \text{ Т}; \quad I_0 = 3{,}6 \text{ А}; \quad \alpha = 31°;$$
$$I_μ = 3{,}07 \text{ А}; \quad I_{ст} = 1{,}84 \text{ А}.$$

Расчет коэффициента мощности предоставляется учащимся выполнить самостоятельно.

9-11*. Однофазный трансформатор был подвергнут испытанию при номинальном первичном напряжении при холостом ходе и при опыте короткого замыкания в условии номинальных токов в обеих обмотках. Показания приборов в первичной и вторичной цепи (рис. 9-14, *а* и *б*) следующие:

$$U_1 = 3300 \text{ В}; \quad U_{2.0} = 220 \text{ В}; \quad I_{1.0} = 0{,}182 \text{ А}; \quad P_{1.0} = 70 \text{ Вт};$$
$$U_{1к} = 188 \text{ В}; \quad I_{1к} = 3{,}04 \text{ А}; \quad I_{2к} = 45{,}5 \text{ А}; \quad P_{1к} = 250 \text{ Вт}.$$

Определить номинальную мощность трансформатора в киловольт-амперах $S_в$; активные сопротивления обмоток r_1 и r_2 (считая, что потери в меди распределяются между обмотками поровну); к. п. д. трансформатора η при номинальной нагрузке для двух значений коэффициента мощности $\cos \varphi_2 = 0{,}8$ и $\cos \varphi_2 = 1$; реактивные сопротивления рассеяния обеих обмоток x_{s1} и x_{s2}, считая относительные падения напряжения в них одинаковыми.

Построить векторную диаграмму этого трансформатора.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепей нагруженного трансформатора можно написать:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_1 + \bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 x_{s1}; \quad \bar{E}_2 = \bar{U}_2 + \bar{I}_2 r_2 + \bar{I}_2 x_{s2}.$$

Заменяя векторные суммы активных и реактивных падений напряжения полными падениями напряжения в обмотках, получаем:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}'_1 + \bar{I}_1 \bar{z}_1$$

и

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 + \bar{I}_2 \bar{z}_2.$$

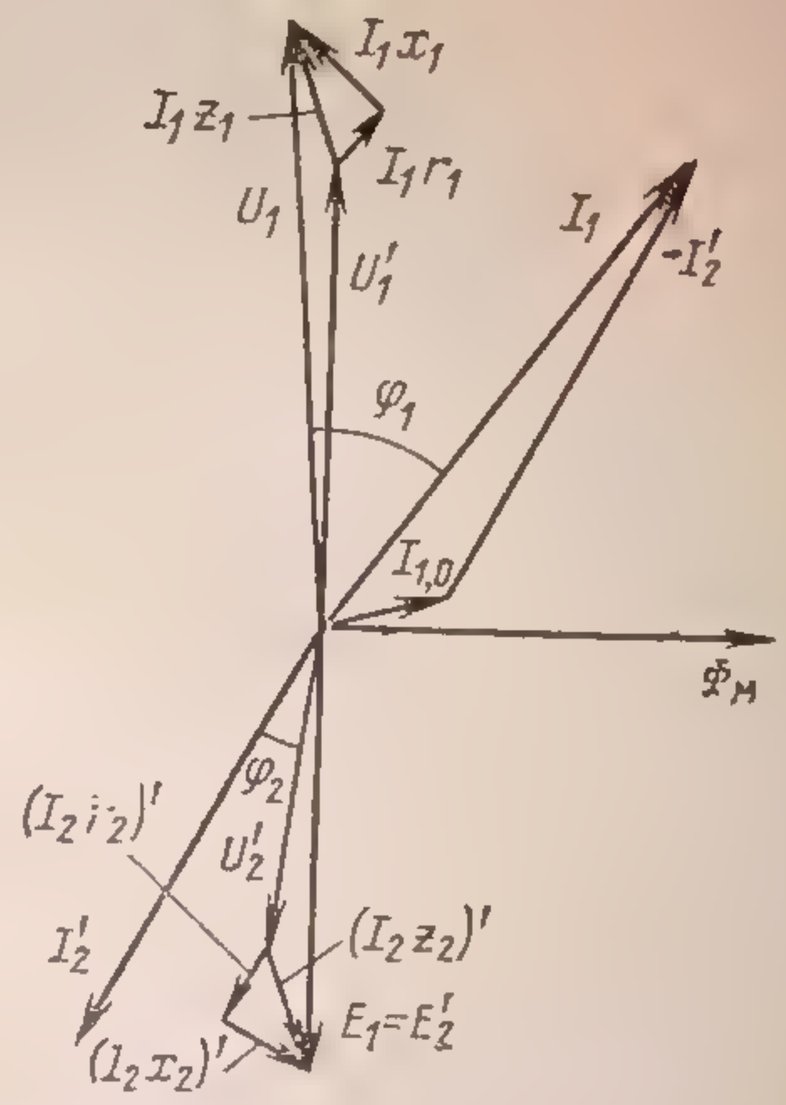


Рис. 9-15. К задаче 9-11.

Пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке $I_1 z_1$ трансформатора, можно написать:

$$U_1 \approx E_1 = 4{,}44 f \Phi_м w_1;$$

отсюда следует, что максимальный магнитный поток трансформатора $\Phi_м$ сохраняется приблизительно постоянным как при холостом ходе, так и при полной нагрузке. Но при холостом ходе магнитный поток создается м. д. с. тока холостого хода ($i_{1.0} w_1$), а при нагрузке — суммой м. д. с. токов в обеих обмотках ($i_1 w_1 + i_2 w_2$). Из постоянства магнитного потока следует, что $i_{1.0} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$. Разделив обе части равенства на w_1, получим $i_{1.0} = i_1 + i_2 \dfrac{w_2}{w_1}$. Величина

$$i_2 \frac{w_2}{w_1} = i_2 \frac{1}{k} = i'_2,$$

где $k = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации, называется *приведенным током вторичной обмотки трансформатора*, тогда $i_1 = i_{1.0} + (-i_2)$. Или, переходя от мгновенных значений к действующим, получаем $\bar{I}_1 = \bar{I}_{1.0} + (-\bar{I}'_2)$.

При построении векторной диаграммы удобно э. д. с. и напряжения вторичной цепи увеличить в k раз, тогда, если учитывать, что $E_1/E_2 = k$, $E_1 = E_2 k = E'_2$ — *приведенная э. д. с. вторичной обмотки трансформатора*. Построение векторной диаграммы выполнено на рис. 9-15 *.

Напряжение короткого замыкания $u_к\% = \dfrac{188}{3300} 100 = 5{,}7\%$. Относительное падение напряжения в каждой обмотке будет по условию

* Для наглядности падения напряжения в обмотках трансформатора и ток холостого хода значительно увеличены.

задачи равно половине $u_{к\%}$, т. е. 2,85%. Тогда

$$I_{1k}\, z_1 = \frac{3300 \cdot 2{,}85}{100} = 94 \text{ В}; \quad I_{2к}\, z_2 = \frac{220 \cdot 2{,}85}{100} = 6{,}27 \text{ В};$$

При опыте короткого замыкания вследствие незначительного значения магнитного потока (малые значения магнитной индукции) потерями в стали можно пренебречь и считать, что мощность при опыте короткого замыкания целиком расходуется на потери в обмотках. Тогда активные сопротивления обмотки определятся из данных опыта короткого замыкания:

$$\frac{P_{1к}}{2} = I_{1к}^2\, r_1$$

и

$$\frac{P_{1к}}{2} = I_{2к}^2\, r_2,$$

откуда активные сопротивления обмоток при подстановке данных будут

$$r_1 = 13{,}5 \text{ Ом}; \quad r_2 = 0{,}06 \text{ Ом}.$$

Полные сопротивления обмоток

$$z_1 = I_{1к}\, z_1 / I_{1к} = 94/3{,}04 \approx 31 \text{ Ом}$$

и

$$z_2 = 6{,}27/45{,}5 \approx 0{,}137 \text{ Ом}.$$

Реактивные сопротивления рассеяния обмоток

$$x_{s1} = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{31^2 - 13{,}5^2} = 27{,}8 \text{ Ом}$$

и

$$x_{s2} = \sqrt{z_2^2 - r_2^2} = 0{,}124 \text{ Ом}.$$

Выражение для полной мощности трансформатора

$$S_н = U_{1н}\, I_{1н} = 3300 \cdot 3{,}04 = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

где $I_{1н} = I_{1к}$ — номинальный первичный ток, или, если пренебрегать малыми значениями потерь в трансформаторе,

$$S_н = U_{2н}\, I_{2н} = 220 \cdot 45{,}5 = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_м} \cdot 100 =$$

$$= \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_м} \cdot 100. \qquad (1)$$

Здесь P_2 — мощность, отдаваемая трансформатором, P_1 — мощность, подводимая к трансформатору.

Считая вторичное напряжение U_2 неизменным, $U_2 = U_{2н}$ вследствие малости падения напряжения, получаем выражение для к. п. д. при номинальной нагрузке:

$$\eta_н, \% = \frac{S_н \cos \varphi_2}{S_н \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_м} \cdot 100.$$

Мощность потерь в стали не зависит от нагрузки и определяется по показанию ваттметра при холостом ходе, $P_{ст} = P_{1.0}$. Мощность потерь в меди при номинальной нагрузке определится по показанию ваттметра из опыта короткого замыкания, $P_м = P_{1к}$. Отсюда к. п. д. трансформатора при номинальной нагрузке получит окончательное выражение:

$$\eta_н, \% = \frac{S_н \cos \varphi_2}{S_н \cos \varphi_2 + P_{1.0} + P_{1к}} \cdot 100.$$

При нагрузке, отличающейся от номинальной, вводится коэффициент загрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{I_1}{I_{1н}}.$$

Тогда к. п. д. трансформатора при любой нагрузке

$$\eta, \% = \frac{\beta S_н \cos \varphi_2}{\beta S_н \cos \varphi_2 + P_{1.0} + \beta^2 P_{1к}} \cdot 100.$$

Вычисление к. п. д. трансформатора при полной нагрузке ($\beta = 1$) для двух значений коэффициента мощности $\cos \varphi_2 = 0{,}8$ и $\cos \varphi_2 = 1$ предоставляется сделать самим учащимся.

Вопросы и упражнения к задачам 9-9—9-11

1. В условиях задачи 9-9 ток холостого хода трансформатора составляет 10% тока в первичной обмотке при полной нагрузке. Определить:

а) полную мощность трансформатора;

б) токи в первичной и вторичной обмотках при полной нагрузке;

в) сечения проводов и сопротивления обеих обмоток, если допускаемая по условиям нагрева плотность тока не должна превышать 2 А/мм². Длину витка принять равной периметру поперечного сечения стали магнитопровода.

2. Для трансформатора задачи 9-10 определить число витков вторичной обмотки с учетом рассеяния и без учета его.

3. Определить, при каком коэффициенте загрузки β: а) 0,1, б) 0,5, в) 1 или г) 1,5 — к. п. д. трансформатора задачи 9-11 при $\cos \varphi_2 = 1$ будет 96,4; 97,6; 98,6; 93,5%.

9-12. Для трансформатора задачи 9-9, пренебрегая активным падением напряжения и рассеянием, определить ток холостого хода, число витков вторичной обмотки w_2, коэффициент мощности $\cos \varphi_2$ по следующим данным: $U_1 = 220$ В; $U_2 = 50$ В; $w_1 = 235$; $a = 100$ мм, $b = 140$ мм; $c = 60$ мм. Построить векторную диаграмму трансформатора при холостом ходе.

9-13. При полной нагрузке трансформатор работает в среднем 7 ч в сутки, а остальное время вхолостую. Определить годовой к. п. д. трансформатора, если полезная мощность его при полной нагрузке $P_2 = 10$ кВт, потери в стали составляют 3%, а потери в меди 2% мощности P_1, подводимой к трансформатору. Определить также годовой к. п. д., если, наоборот, потери в стали принять равными

ми 2%, а потери в меди 3% мощности P_1, подводимой к трансформатору.

9-14. Однофазный трансформатор 400/50 В мощностью 1 кВ·А имеет потери короткого замыкания при номинальной нагрузке $P_{1к}$ = 150 Вт. Допускаемая по условиям нагрева обмоток плотность тока составляет 4 А/мм², длина витка для обеих обмоток одинакова и равна 40 см.

Условие 1. Считая, что потери в меди поровну распределяются между обмотками, определить номинальный ток и число витков каждой обмотки.

Условие 2. Относительное напряжение короткого замыкания $u_к$ в процентах поровну идет на покрытие падений напряжения в обеих обмотках. Определить активные и реактивные сопротивления обмоток ($u_к$ принять равным 15%).

Условие 3. Определить токи в обмотках трансформатора при эксплуатационном коротком замыкании.

Указание. При эксплуатационном коротком замыкании считаем, что половина приложенного напряжения покрывает падение напряжения в первичной обмотке, а другая половина с учетом коэффициента трансформации идет на покрытие падения напряжения во вторичной обмотке, т. е.

$$\frac{U_1}{2} = I_{1к.з} z_1$$

и

$$\frac{U_1}{2k} = I_{2к.з} z_2.$$

9-3. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ, ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ИХ. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

9-15*. Трехфазный трансформатор (рис. 9-16) имеет разметку концов, при которой напряжения на первичных обмотках совпадают по фазе с одноименными напряжениями соответствующих вторичных обмоток. Определить, к какой группе относится трансформатор при соединениях обмоток, указанных на рис. 9-17.

Какие из указанных соединений обмоток стандартизованы по ГОСТ?

Определить также для указанных соединений обмоток отношения коэффициентов трансформации линейных и фазных напряжений $k/k_ф$.

Анализ и решение

Направления мгновенных фазных напряжений будем считать положительными для первичной обмотки от начала фазы к концу, для вторичной обмотки от конца фазы к началу или по отношению к потребителю также от начала «н» к концу «к». На схемах заданных соединений обмоток положительные направления напряжений указаны стрелками (рис. 9-18, *а*, 9-19, *а*; 9-20, *а*).

Для первой схемы соединения обмоток (рис. 9-18, *а*) мгновенные фазные напряжения, например, для одной фазы первичной и вто-

ричной обмоток выразятся разностью соответствующих потенциалов: $u_A = \varphi_A - \varphi_X$ и $u_a = \varphi_a - \varphi_x$.

Эти напряжения будут совпадать по фазе. То же можно сказать и в отношении напряжений двух других фаз. Векторные диаграммы для этого случая показаны на рис. 9-18, *б*.

Рассмотрим векторы линейных напряжений первичной и вторичной обмоток, например векторы U_{AB}, U_{ab}. Для этого совместим

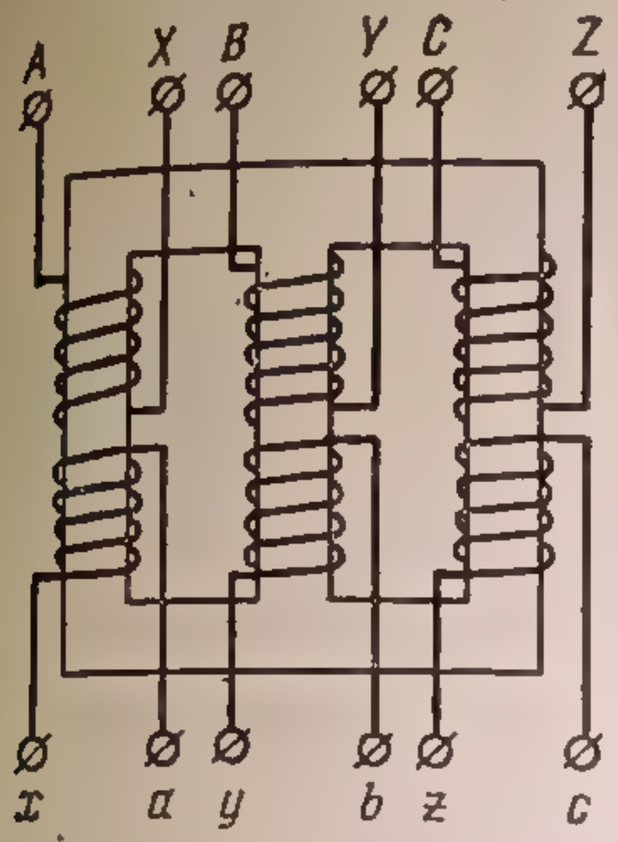


Рис. 9-16. К задаче 9-15.

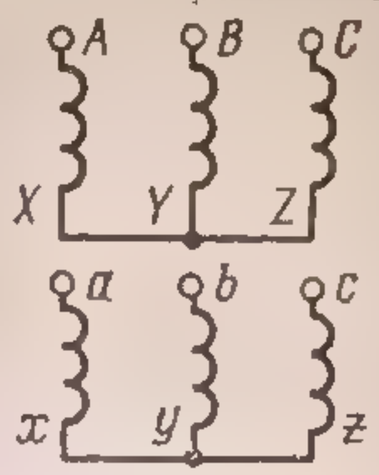
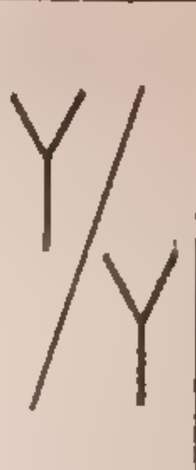
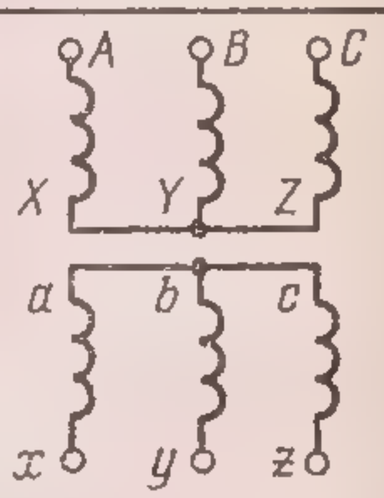
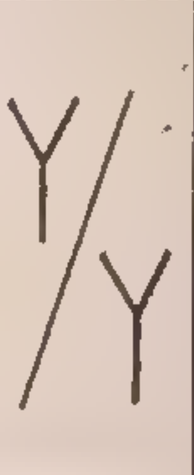
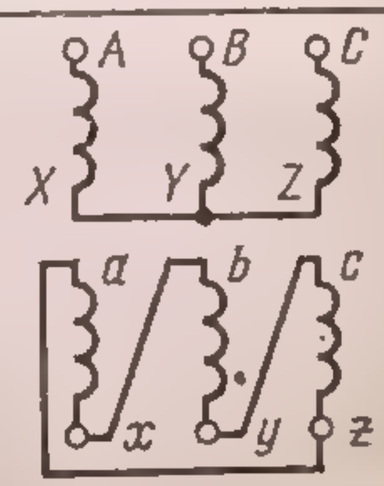
№ п/п	Схема соединений ВН/НН	Условн. обозначения
1		
2		
3		

Рис. 9-17. Таблица к задаче 9-15.

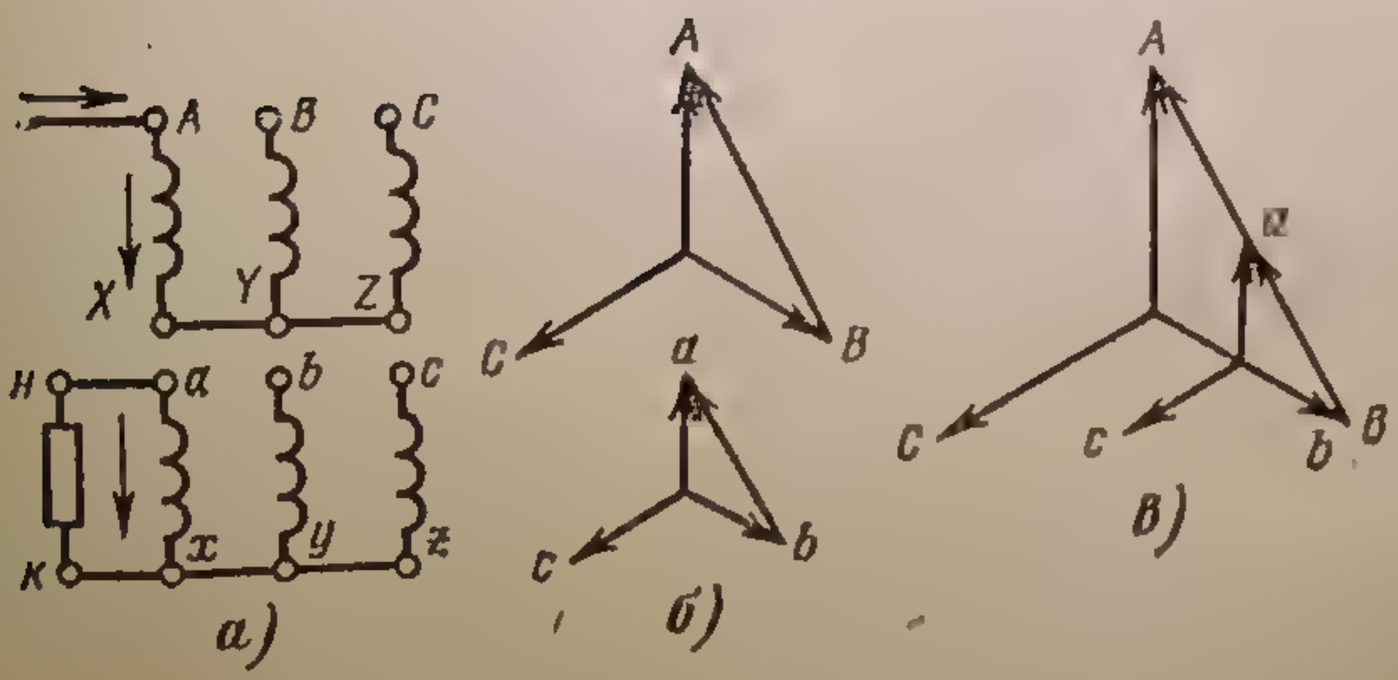


Рис. 9-18. К задаче 9-15.

точки B и b векторных диаграмм (рис. 9-18, *а*). Тогда векторы U_{AB} и U_{ab} совпадут по направлению. Если считать, что вектор U_{AB} совпадает с большой (минутной) стрелкой часов, стоящей на цифре циферблата 12, а вектор напряжения U_{ab} совпадает с малой стрелкой часов, то оба вектора займут положение, которое стрелки часов занимают в полдень или в полночь. Данное соединение обмоток относится к группе 0 и обозначается Y/Y-0.

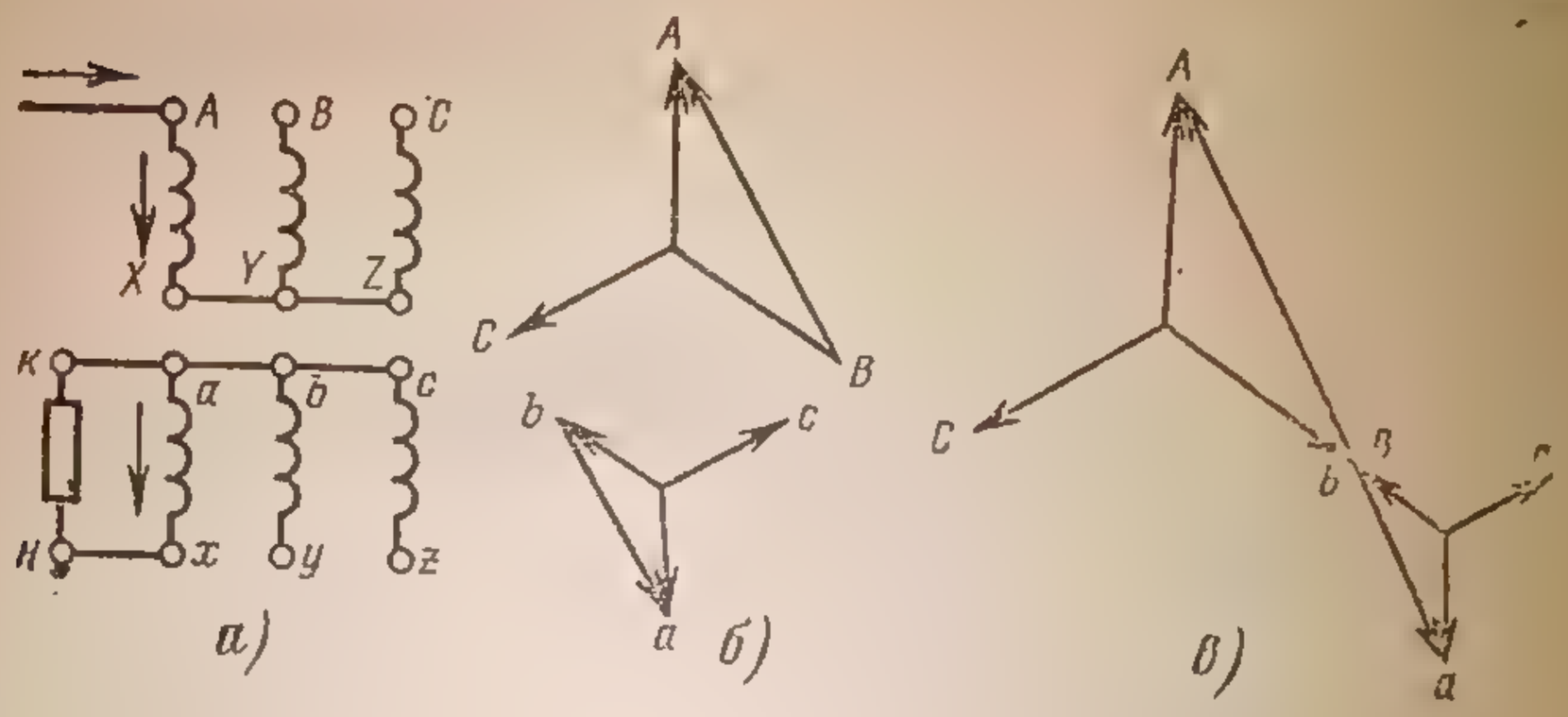


Рис. 9-19. К задаче 9-15.

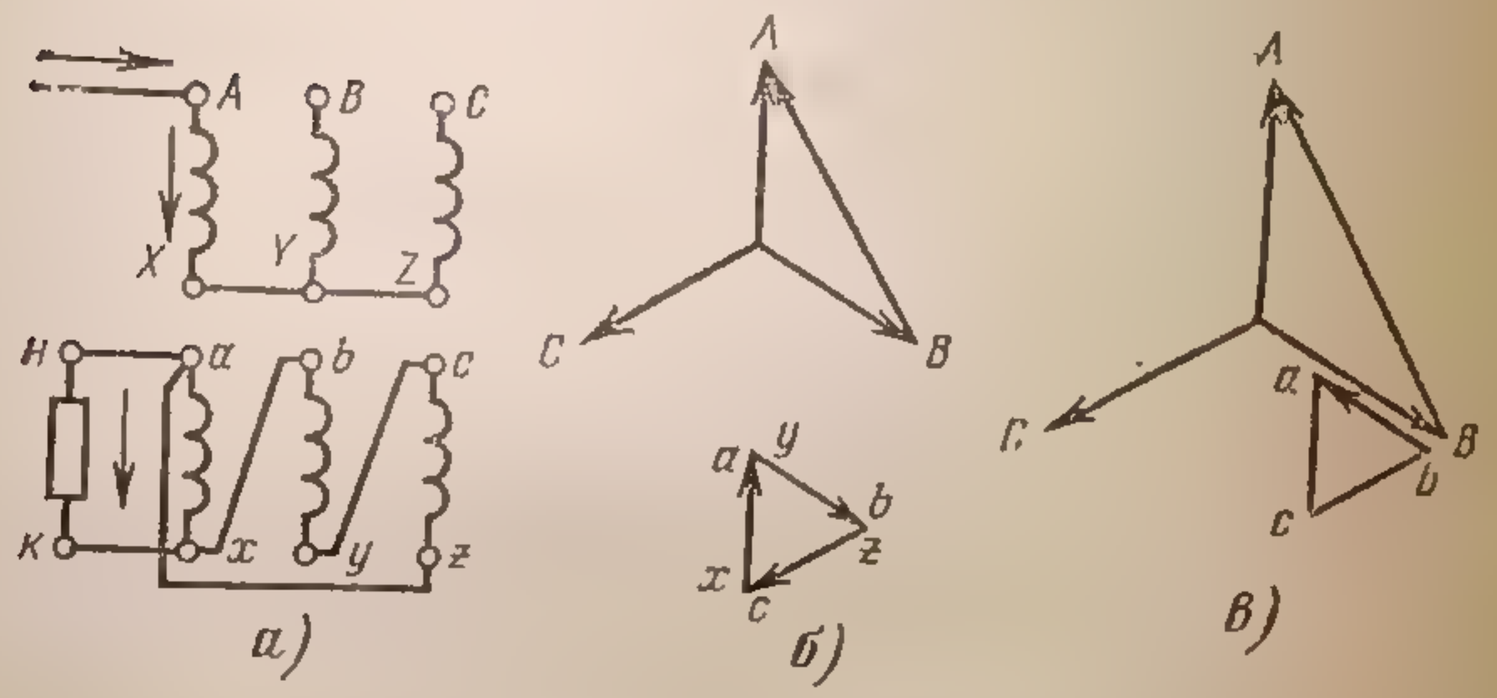


Рис. 9-20. К задаче 9-15.

Во второй схеме соединения обмоток для первичной обмотки сохраняются те же условия, что в первом случае, а для вторичной обмотки выводы x, y, z будут являться началами фаз, а выводы a, b, c — концами фаз. Это равносильно изменению направления фазных напряжений во вторичной обмотке (рис. 9-19, *а*). Теперь мгновенные фазные напряжения для одной фазы первичной и вторичной обмоток выразятся: $u_A = \varphi_A - \varphi_X$ и $u_a = \varphi_x - \varphi_a = -(\varphi_a - \varphi_x)$.

Отсюда следует, что для первого и второго случаев одноименные фазные напряжения во вторичной обмотке равны и противоположны по знаку, а векторы их сдвинуты друг относительно друга на 180°. Векторные диаграммы для рассматриваемой схемы соединения обмоток представлены на рис. 9-19, *б*. При совмещении точек B и b векторных диаграмм (рис. 9-19, *в*) векторы линейных напряже-

ний, например U_{AB} и U_{ab}, будут повернуты один относительно другого на 180°.

Если расположить эти векторы на циферблате часов так, чтобы вектор первичного линейного напряжения указывал на цифру 12, тогда вектор вторичного линейного напряжения будет указывать на цифру 6.

Положение векторов в данном случае совпадает с положением стрелок часов в 6 часов. Данное соединение обмоток относят к шестой группе и обозначают Y/Y-6.

Для третьей схемы соединения обмоток (рис. 9-20, *а*) мгновенные фазные напряжения для одной фазы первичной и вторичной обмоток выразятся:

$$u_A = \Phi_A - \Phi_X \text{ и } u_a = \Phi_a - \Phi_x.$$

Эти напряжения будут совпадать по фазе, и векторные диаграммы для них с учетом соединения вторичной обмотки в треугольник изобразятся так, как показано на рис. 9-20, *б* (векторы напряжений следуют по ходу соединения обмотки). Совместив точки B и b диаграмм (рис. 9-20, *в*) и рассматривая положение одноименных векторов линейных напряжений, например, U_{AB} и U_{ab} на циферблате часов, легко убедиться, что положение векторов совпадает с положением стрелок часов в 11 часов. Данное соединение обозначают Y/Δ-11.

По ГОСТ стандартизованы две группы Y/Y-0 и Y/Δ-11.

Коэффициент трансформации фазных напряжений равен отношению фазных напряжений высшего к низшему при холостом ходе:

$$k_\Phi = U_{1\Phi}/U_{2\Phi}.$$

Отсюда следует, что коэффициент трансформации фазных напряжений не зависит от схемы соединения обмоток.

Коэффициент трансформации линейных напряжений $k = U_{1л}/U_{2л}$ зависит от схемы соединения обмоток. Так, для схем Y/Y-0 и Y/Y-6

$$k = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{\sqrt{3}U_{1\Phi}}{\sqrt{3}U_{2\Phi}} = k_\Phi$$

и

$$k/k_\Phi = 1.$$

Для схемы Y/Δ-11

$$k = U_{1л}/U_{2л} = \sqrt{3}U_{1\Phi}/U_{2\Phi} = \sqrt{3}k_\Phi$$

и

$$k/k_\Phi = \sqrt{3}.$$

9-16*. Два однофазных трансформатора 6600/220 В мощностью по 22 кВ·А каждый включаются на параллельную работу (рис. 9-21).

Согласно правилам технической эксплуатации параллельная работа трансформаторов допускается при условии, если:

а) группы соединений одинаковы [1], а соотношения между мощностями не более 1 : 3;

---

[1] У однофазных трансформаторов могут быть только группы 0 и 6.

б) коэффициенты трансформации равны или различаются не более чем на ±0,5% (при одинаковых номинальных напряжениях);

в) напряжения короткого замыкания различаются не более чем на ±10% среднего арифметического их значения.

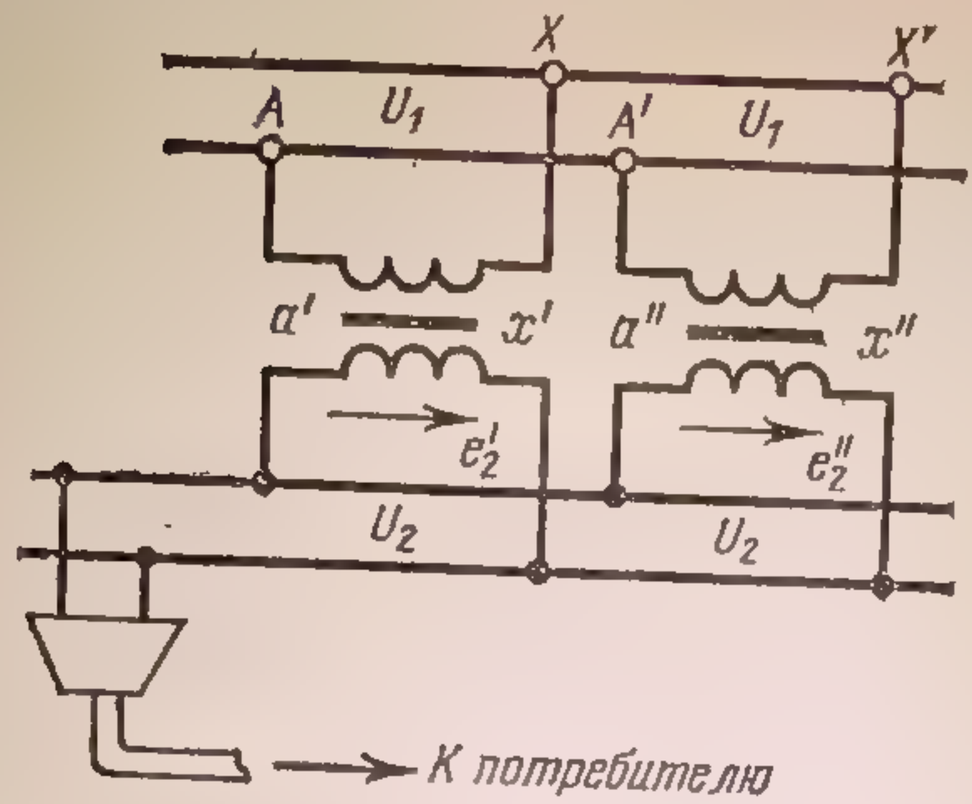


Рис. 9-21. К задаче 9-16.

Определить напряжение на вторичных шинах U_{02} при холостом ходе и токи во вторичных обмотках трансформатора при холостом ходе и при включенной нагрузке потребителя.

При расчете принять, что внешние характеристики трансформаторов имеют линейный характер и падения напряжения во вторичных обмотках трансформаторов равны потерям напряжения в них.

Условие 1. Все требования для включения трансформаторов на параллельную работу соблюдаются.

При включении нагрузки напряжение на вторичных шинах $U_2 = 215$ В, процентные изменения напряжения для обоих трансформаторов при номинальной нагрузке 4,55%.

Анализ и решение

При параллельной работе трансформаторов на выводах вторичных обмоток каждого из них, присоединенных к общим шинам, устанавливается одно и то же напряжение U_2. При правильном включении (одинаковые группы, рис. 9-21) при обходе замкнутого контура, образуемого вторичными обмотками через общие шины, одинаковые э. д. с. вторичных обмоток направлены встречно. Поэтому при холостом ходе токи во вторичных обмотках отсутствуют, $I'_{02} = I''_{02} = 0$, и на общих шинах установится напряжение $U_2 = U_{02} = 220$ В.

Для определения токов во вторичных обмотках трансформаторов при включенной нагрузке следует построить внешние характеристики.

Исходя из условия задачи, что внешние характеристики трансформаторов $U_2 = f(I_2)$ следует считать линейными функциями тока, построение характеристик можно выполнить по двум точкам: 1) при холостом ходе ($I_2 = 0$ и $U_{02} = 220$ В); 2) при номинальной нагрузке ($I_{2н} = S_н/U_{02} = 22\,000/220 = 100$ А и $U_2 < 220$ В).

Напряжение U_2 при номинальной нагрузке определяется по заданной величине процентного изменения напряжения

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{02} - U_2}{U_{02}} \cdot 100;$$

отсюда

$$U_2 = U_{02} - U_{02}\frac{\Delta U_{\%}}{100} = 220 - 220 \cdot \frac{4{,}55}{100} = 210 \text{ В}.$$

При одинаковых коэффициентах трансформации и процентных изменениях напряжения внешние характеристики обоих трансформаторов совпадают и представляются одной прямой I на рис. 9-22.

Заданному напряжению на шинах $U_2'=U_2''=215$ В соответствуют токи во вторичных обмотках трансформаторов $I_2'=I_2''=50$ А.

Условие 2. При одинаковых коэффициентах трансформации процентные изменения номинального напряжения у трансформаторов разные: $\Delta U_{\%}'=4{,}55\%$ и $\Delta U_{\%}''=9{,}1\%$. При включенной нагрузке на общих шинах устанавливается напряжение 205 В.

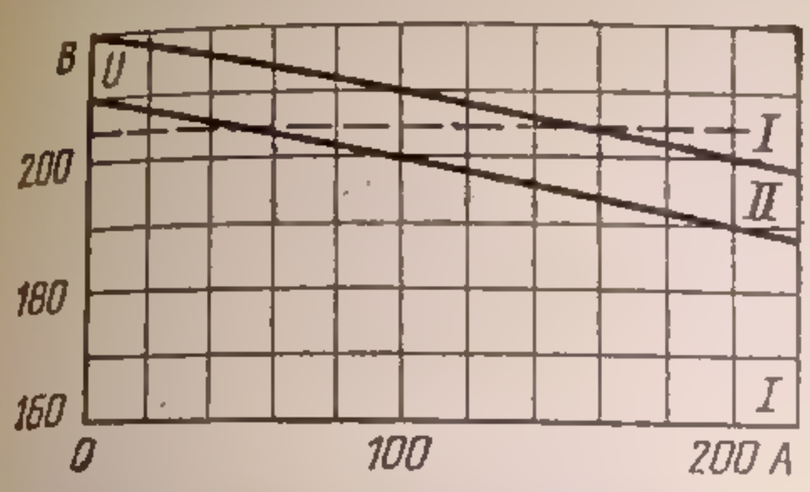


Рис. 9-22. К задаче 9-16.

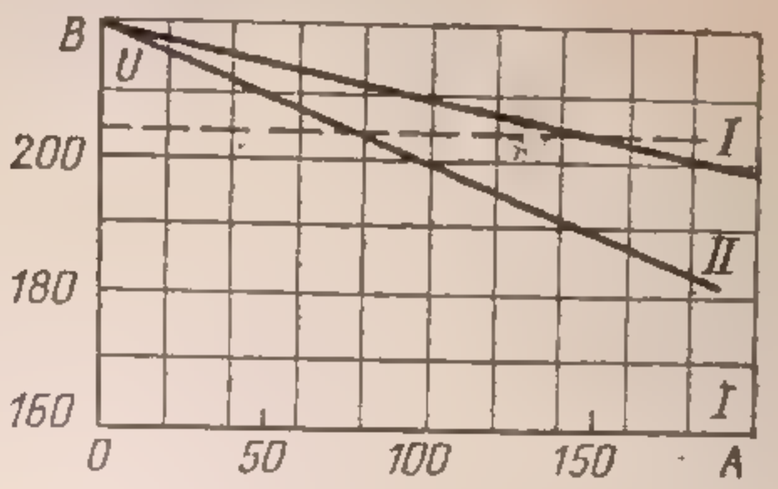


Рис. 9-23. К задаче 9-16.

Анализ и решение

При одинаковых коэффициентах трансформации э. д. с. во вторичных обмотках равны и направлены встречно. Поэтому при холостом ходе токи во вторичных обмотках трансформаторов $I_{02}'=I_{02}''=0$, и на общих шинах установится напряжение $U_2=U_{02}=220$ В. Для определения токов во вторичных обмотках при включенной нагрузке следует построить внешние характеристики. Построение каждой характеристики выполнено по двум точкам, как было показано в решении задачи по условию 1, и представлено на рис. 9-23.

Заданному напряжению на шинах $U_2=205$ В соответствуют токи во вторичных обмотках трансформаторов $I_2'=150$ А и $I_2''=75$ А.

Отсюда следует, что при разных процентных изменениях напряжения (обусловленных различными значениями напряжений короткого замыкания) нагрузка не будет поровну распределяться между параллельно работающими трансформаторами: один трансформатор будет перегружен, другой недогружен.

Условие 3. На параллельную работу включаются два трансформатора с одинаковыми изменениями напряжения $\Delta U=10$ В при токе $I_2'=I_2''=100$ А, но с разными коэффициентами трансформации $k_1=6600/220$ и $k_2=6600/210$. При включенной нагрузке на вторичных шинах устанавливается напряжение 205 В.

Анализ и решение

Для определения токов во вторичных обмотках при включенной нагрузке следует построить внешние характеристики трансформато-

ров. По условию задачи характеристики принимаются линейными, следовательно, построение каждой из них может быть выполнено по двум точкам: характеристика *I* по точкам $I'_{02}=0$, $U'_{02}=220$ В и $I'_2=100$ А и $U'_2=210$ В; характеристика *II* по точкам $I''_{02}=0$, $U''_{02}=210$ В и $I''_2=100$ А, $U''_2=200$ В (рис. 9-22). Как видно из характеристик, заданному напряжению на шинах $U_2=205$ В соответствуют токи $I'_2=150$ А и $I''_2=50$ А. Как и в предыдущем случае, одни трансформатор будет перегружен, другой недогружен.

При холостом ходе в замкнутом контуре, образованном через общие шины вторичными обмотками трансформаторов (рис. 9-21), действует э. д. с. $\Delta E=E_1-E_2=10$ В. Под действием этой э. д. с. в обмотках трансформатора будет протекать уравнительный ток, выравнивающий напряжение на зажимах вторичных обмоток, присоединенных к общим шинам. Этот ток вызовет нагревание обмоток, что недопустимо. Этот ток создаст падение напряжения во вторичных обмотках $\overline{I_{02}Z'_2}$ и $\overline{I_{02}Z''_2}$, и по второму закону Кирхгофа $\Delta\bar{E}=\overline{I_{02}Z'_2}+\overline{I_{02}Z''_2}$. По условию задачи падение напряжения можно считать равным потерям напряжения. Это значит, что последнее равенство можно написать не в векторной форме $\Delta E=I_{02}z'+I_{02}z''_2$. Отсюда следует, что

$$I_{02}=\frac{\Delta E}{z'_2+z''}.$$

Полные сопротивления вторичных обмоток z'_2 и z''_2 можно определить по вычисленным токам при включенной нагрузке: $z'_2=\Delta U/I'_2=10/150=0{,}067$ Ом и $z''_2=\Delta U/I''_2=10/50=0{,}2$ Ом. Теперь ток во вторичных обмотках трансформатора при холостом ходе определится:

$$I_{02}=\frac{\Delta E}{z'_2+z''_2}=\frac{10}{0{,}267}=37{,}5\text{ А}.$$

Падения напряжения во вторичных обмотках $I_{02}z'_2=37{,}5\cdot0{,}067=2{,}5$ В; $I_{02}z''_2=37{,}5\cdot0{,}2=7{,}5$ В.

Напряжение на вторичных шинах при холостом ходе $U_{02}=E'_2-I_{02}z'_2=E''_2+I_{02}z''_2=217{,}5$ В.

Таким образом, при холостом ходе по обмоткам трансформаторов протекают значительные токи, вызывая непроизводительный расход энергии.

Условие 4. Два трехфазных трансформатора напряжением 6600/200 В присоединены со стороны высшего напряжения к общим шинам, с линейным напряжением 6600 В.

Установить возможность включения обмоток низшего напряжения на общие вторичные шины, если трансформаторы принадлежат к следующим группам соединения:

№ п/п.	Первый трансформатор	Второй трансформатор
1	Y/Y-0	Y/Y-0
2	Y/Y-0	Y/Y-6

Каковы будут при этом показания вольтметров, включенных, как указано на схеме (рис. 9-24)?

Анализ и решение

При включении на параллельную работу трансформаторов с одинаковыми группами Y/Y-12 вторичные линейные напряжения будут совпадать по фазе, показания вольтметров (рис. 9-24) будут равны нулю, и при присоединении вторичных обмоток к общим шинам

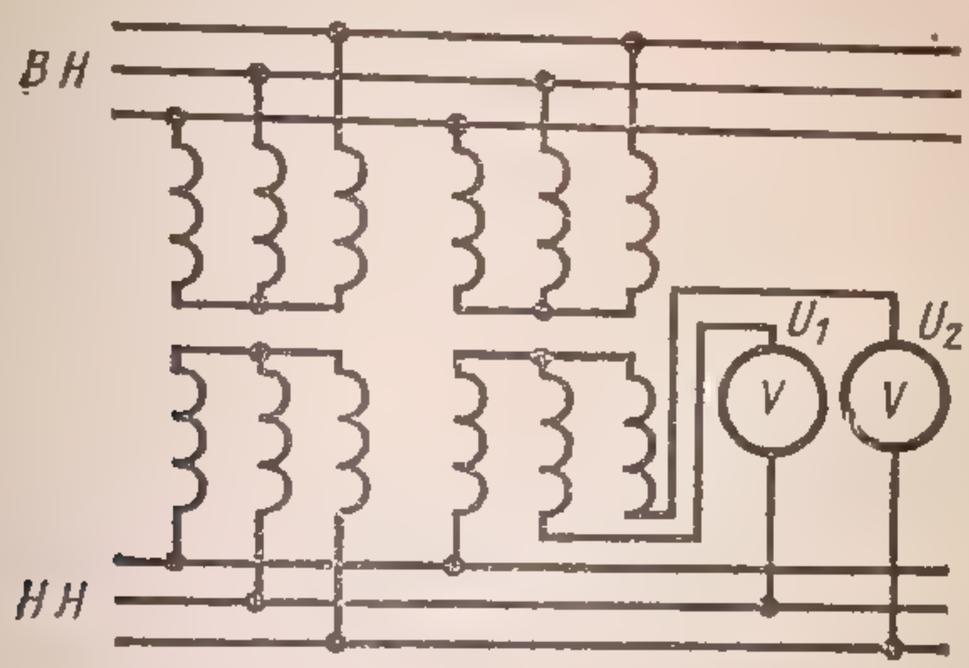


Рис. 9-24. К задаче 9-16.

уравнительные токи возникать не будут. Если же трансформаторы принадлежат к разным группам, вольтметры будут показывать векторную разность линейных напряжений. Для групп соединений 12 и 6 вторичные линейные напряжения сдвинуты по фазе на 180° и показания вольтметра будут равны двойному фазовому напряжению: $U_1 = U_2 = 2 \cdot 220/\sqrt{3} = 254$ В; включение трансформаторов на параллельную работу недопустимо.

Вопросы и упражнения к задачам 9-15, 9-16

1. Первичная обмотка одного трехфазного трансформатора соединена в звезду, другого в треугольник. Оба трансформатора присоединены к сети с одинаковым напряжением и имеют одинаковые магнитные потоки. Определить, у какого трансформатора должно быть больше витков на фазу и во сколько раз?

2. Два трехфазных трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 15$ присоединены со стороны высшего напряжения к трехфазной сети с линейным напряжением 3300 В. Определить векторную разность одноименных линейных напряжений трансформаторов во вторичной цепи и в соответствии с этим установить возможность

включения трансформаторов на параллельную работу, если трансформаторы принадлежат к следующим группам: а) Y/Δ-11 и Y/Δ-1; б) Y/Δ-11 и Y/Δ-5*.

3. В трехфазном трансформаторе числа витков на фазу первичной обмотки $w_1 = 2080$, вторичной $w_2 = 80$.

Первичное линейное напряжение $U_1 = 3300$ В. Определить, при каком из следующих соединений обмоток: а) звезда — звезда; б) звезда — треугольник; в) треугольник — звезда; г) треугольник — треугольник, вторичное линейное напряжение и коэффициент трансформации линейных напряжений соответственно будут: 220 В и 15; 73,3 В и 45; 127 В и 26.

4. Определить, при какой схеме соединения обмоток из указанных в таблице (рис. 9-25) трехфазный трансформатор относится к группе 12; 11; 6; 1.

9-17. В таблице приведены данные, взятые из ГОСТ, на трехфазные трансформаторы различной мощности.

Номинальная мощность, кВ·А	Верхний предел номинальных напряжений обмоток, кВ		Потери, Вт		Напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения	Ток холостого хода в процентах номинального тока
	высшего напряжения	низшего напряжения	холостого хода при номинальном напряжении	короткого замыкания при номинальной нагрузке		
25	6,3	0,400	130	600	4,5	3,2
25	10	0,400	130	600	4,5	3,2
40	6,3	0,400	175	880	4,5	3,0
40	10	0,400	175	880	4,5	3,0
63	6,3	0,400	240	1280	4 5	2,8
63	10	0,400	240	1280	4.5	2,8
100	6,3	0,400	330	1970	4,5	2,6
160	6,3	0,400	510	2650	4,5	2,4
160	10	0,400	510	2650	4,5	2,4

Условие 1. Пользуясь данными таблицы, определить для трансформатора номинальные линейные токи в первичной и вторичной обмотках $I_{1л}$ и $I_{2л}$; к. п. д. трансформатора η при номинальном токе и двух значениях $\cos\varphi_2$: 0,8 и 1; к. п. д. трансформатора η при половинной нагрузке и двух значениях $\cos\varphi_2$: 0,8 и 1; активные и реактивные сопротивления обеих обмоток, считая, что потери в меди и процентное падение напряжения при опыте короткого замыкания $u_к$, %, распределяются между обеими обмотками поровну.

Задачу решить для следующих, предусмотренных ГОСТ, соединений обмоток трансформатора: звезда — треугольник, звезда —

* Если поменять местами начала и концы у всех фаз вторичной обмотки трансформаторов группы Y/Δ−11, то все векторы вторичных фазовых и линейных напряжений будут повернуты на 180°, что соответствует повороту часовой стрелки также на 180° (на 6 ч), и, следовательно, группа будет Y/Δ-5.

звезда. При определении к. п. д. считать, что низшее напряжение U_2 остается постоянным в широких пределах изменения нагрузки.

Условие 2. Начертить векторные диаграммы для одной фазы нагруженного трансформатора при активно-индуктивной ($\cos\varphi_2 < 1$) и активной нагрузке ($\cos\varphi_2 = 1$).

9-18. Два трехфазных трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 15$ и соединением обмоток звезда — треугольник присоединены со стороны высшего напряжения к трехфазной сети с линейным напряжением 3300 В. Разметка выводов обмоток трансфор-

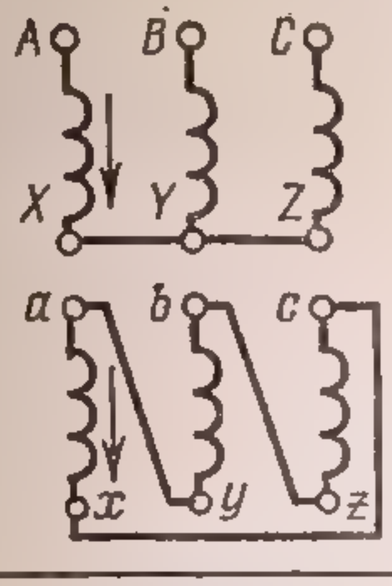
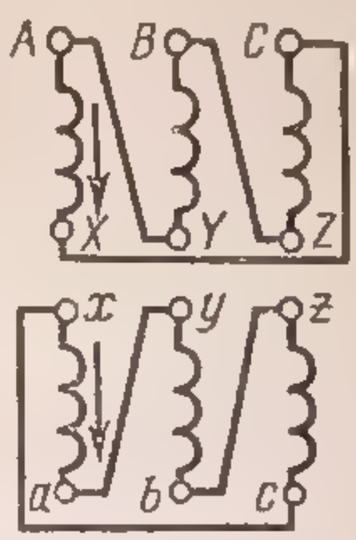
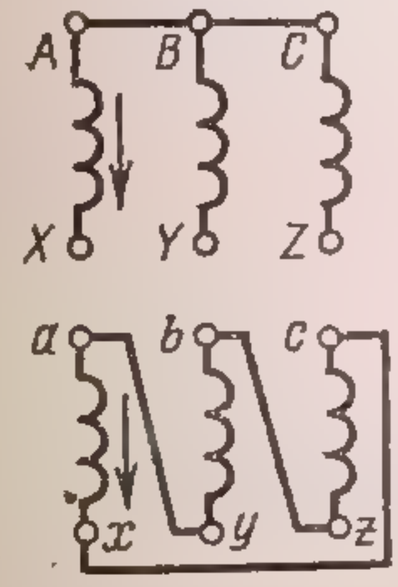
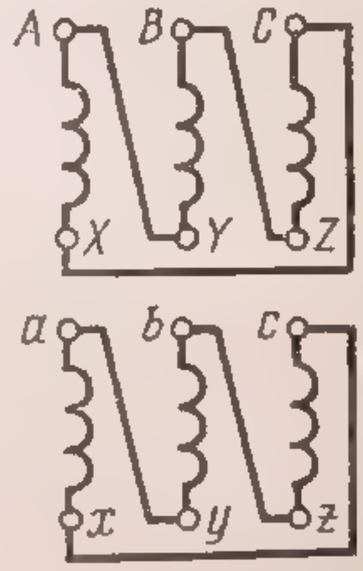
№ п/п.	Схема соединений ВН/НН	Условные обозначения	№ п/п.	Схема соединений ВН/НН	Условные обозначения
1			3		
2			4		

Рис. 9-25. Таблица к задачам 9-15, 9-16.

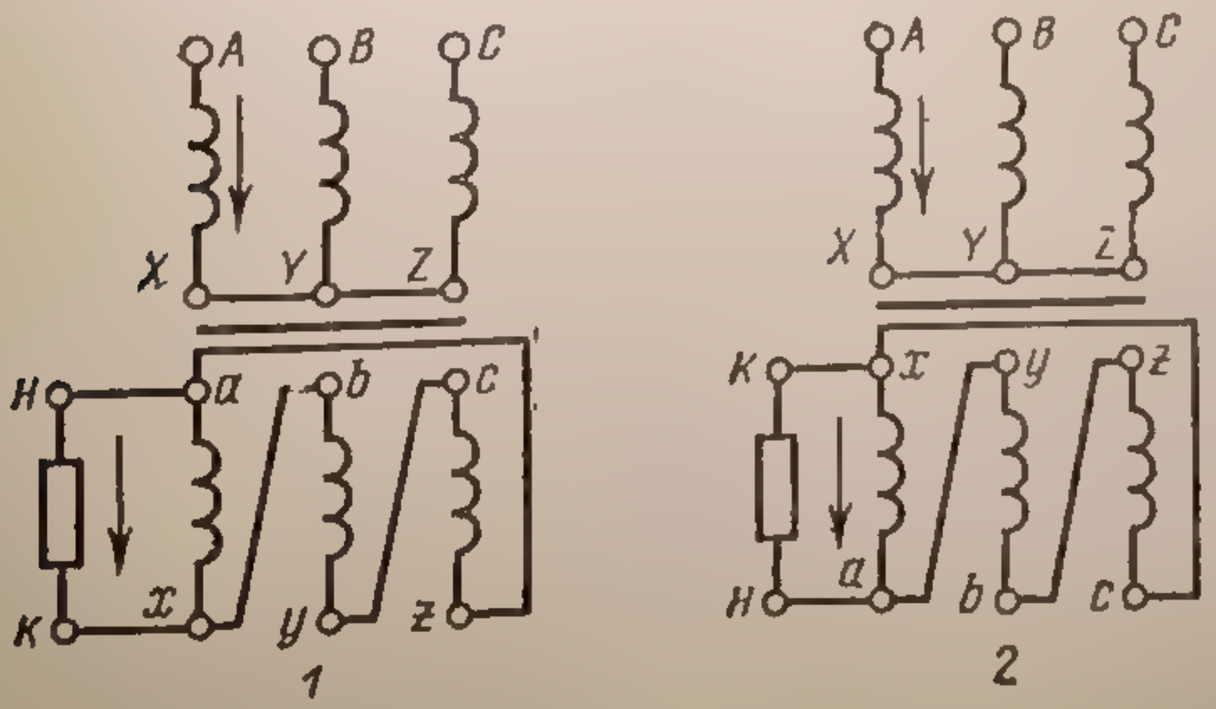


Рис. 9-26. К задаче 9-18.

маторов показана на схеме рис. 9-26. Определить группы соединения обмоток трансформаторов, векторную разность одноименных линейных вторичных напряжений и установить возможность включения трансформаторов на параллельную работу.

9-4. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

9-19*. Автотрансформатор и однофазный трансформатор имеют одинаковые данные на схемах рис. 9-27, *а* и *б* (w_1, w_2, U_1, U_2, I_1, I_2).

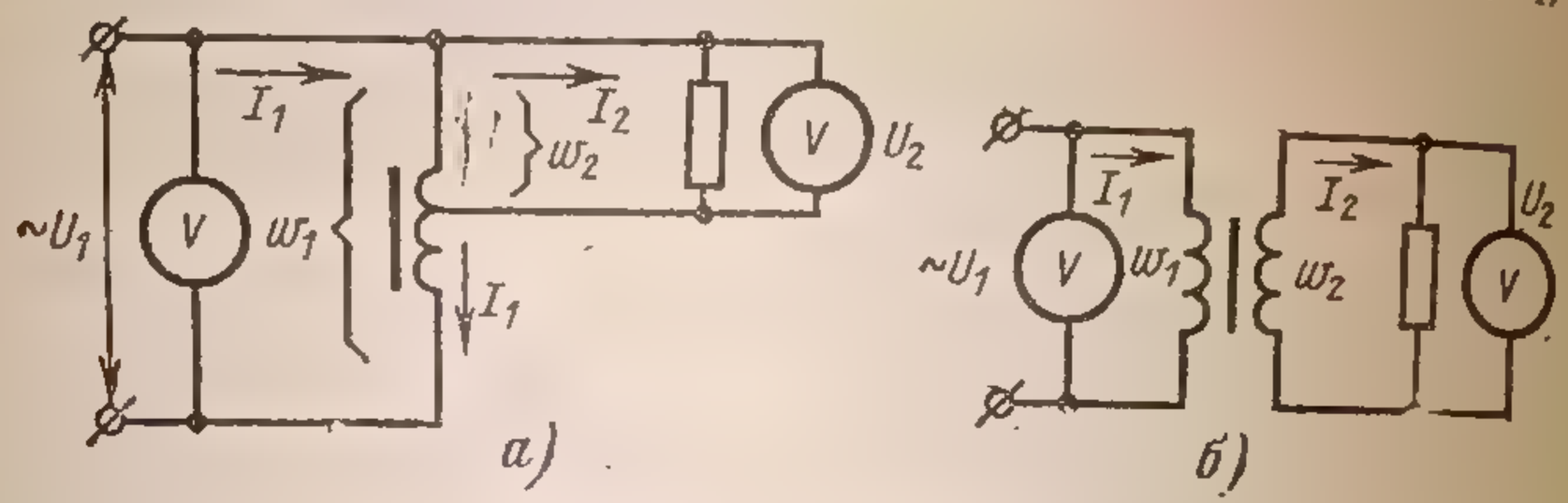


Рис. 9-27. К задачам 9-19, 9-21.

Пренебрегая током холостого хода, определить отношение потерь в меди и отношение масс меди для обоих трансформаторов, принимая для их обмоток одинаковую допускаемую по условиям нагрева плотность тока и одинаковую длину витков. Задачу решить в общем виде.

Анализ и решение

Масса меди автотрансформатора в граммах может быть определена следующим образом:

$$M_{\text{м.авто}} = l_{\text{в}} S_1 d_0 (w_1 - w_2) + l_{\text{в}} S_2 d_0 w_2,$$

где $l_{\text{в}}$ — длина витка обмотки трансформатора, м; S_1 — сечение обмотки, м², на участке с числом витков $w_1 - w_2$, по которому проходит ток I_1; S_2 — сечение обмотки, м², на участке с числом витков w_2, по которому проходит ток, равный $I_2 - I_1$; d_0 — плотность меди обмотки, кг/м³.

При допускаемой плотности тока δ, А/м², сечение обмотки $S_1 = I_1/\delta$, сечение

$$S_2 = \frac{I_2 - I_1}{\delta}.$$

Подставляя эти выражения в формулу для массы меди автотрансформатора, получаем:

$$M_{\text{м.авто}} = l_{\text{в}} \frac{I_1}{\delta} d_0 (w_1 - w_2) + l_{\text{в}} \frac{I_2 - I_1}{\delta} d_0 w_2.$$

Масса меди однофазного трансформатора может быть аналогично выражена:

$$M_{\text{м.тр}} = l_{\text{в}} w_1 \frac{I_1}{\delta} d_0 + l_{\text{в}} w_2 \frac{I_2}{\delta} d_0;$$

Отношение масс после сокращения будет:

$$\frac{M_{\text{м.авто}}}{M_{\text{м.тр}}} = \frac{I_1(w_1 - w_2) + (I_2 - I_1)w_2}{I_1 w_1 + I_2 w_2} = \frac{I_1(w_1 - 2w_2) + I_2 w_2}{I_1 w_1 + I_2 w_2}. \quad (1)$$

Коэффициент трансформации для обоих трансформаторов

$$k = I_2/I_1 = w_1/w_2,$$

откуда

$$I_2 = I_1 w_1/w_2;$$

Подставляя выражение I_2 в уравнение (1), получаем:

$$\frac{M_{\text{м.авто}}}{M_{\text{м.тр}}} = \frac{I_1(w_1 - 2w_2) + I_1 w_1}{I_1 w_1 + I_1 w_1} = \frac{w_1 - w_2}{w_1}; \quad (2)$$

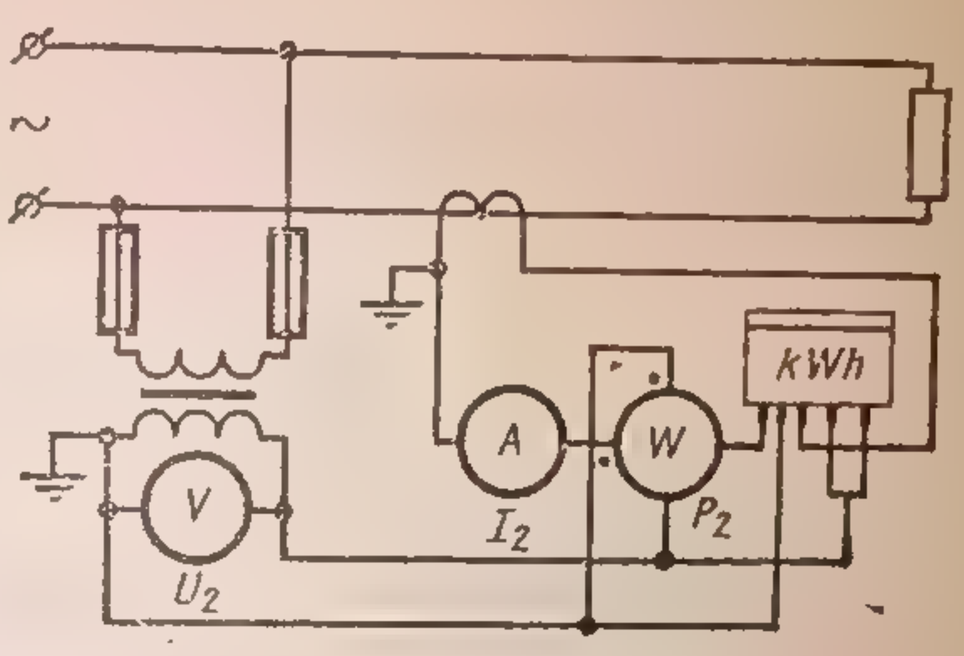


Рис. 9-28. К задачам 9-20, 9-23.

Мощность потерь в меди автотранеформатора выразится:

$$P_{\text{м.авто}} = \frac{I_1^2 l_{\text{в}} (w_1 - w_2)}{\gamma S_1} + \frac{(I_2 - I_1)^2 l_{\text{в}} w_2}{\gamma S_2},$$

где γ — удельная проводимость меди, См/м.

Заменяя $S_1 = I_1/\delta$, $S_2 = \frac{I_2 - I_1}{\delta}$ и сокращая, получаем:

$$P_{\text{м.авто}} = \frac{I_1 l_{\text{в}} (w_1 - w_2)\delta}{\gamma} + \frac{(I_2 - I_1) l_{\text{в}} w_2 \delta}{\gamma},$$

Аналогично для однофазного трансформатора

$$P_{\text{м.тр}} = \frac{I_1^2 w_1 l_{\text{в}} \delta}{\gamma I_1} + \frac{I_2^2 w_2 l_{\text{в}} \delta}{\gamma I_2},$$

Теперь легко убедиться, что отношение потерь в меди будет равно отношению масс меди обоих трансформаторов:

$$\frac{P_{\text{м.авто}}}{P_{\text{м.тр}}} = \frac{I_1 (w_1 - w_2) + (I_2 - I_1) w_2}{I_1 w_1 + I_2 w_2} = \frac{I_1 (w_1 - 2w_2) + I_2 w_2}{I_1 w_1 + I_2 w_2}, \quad (1)$$

Следовательно,

$$\frac{P_{\text{м.авто}}}{P_{\text{м.тр}}} = \frac{M_{\text{м.авто}}}{M_{\text{м.тр}}} = \frac{w_1 - w_2}{w_1}, \quad (2)$$

9-20. Схема включения измерительных приборов через трансформаторы напряжения 3000/100 В и тока 100/5 А дана на рис. 9-28. Показания приборов оказались следующими: вольтметра $U_2=80$ В, амперметра $I_2=4$ А, ваттметра $P_2=256$ Вт.

Условие 1. Определить в первичной сети: напряжение U_1, ток I_1, мощность P_1, расход энергии W_1 за 8 ч работы и показание счетчика W_2 за то же время.

Анализ и решение

Коэффициенты трансформации трансформатора напряжения $k_u=U_{1н}/U_{2н}=3000/100=30$, трансформатора тока $k_i=I_{1н}/I_{2н}=100/5=20$.

При заданных показаниях измерительных приборов $U_1=U_2k_u=80\cdot30=2400$ В; $I_1=I_2k_i=4\cdot20=80$ А. Мощность в первичной цепи $P_1=U_1I_1\cos\varphi_1=U_2k_uI_2k_i\cos\varphi_1$.

Показание ваттметра $P_2=U_2I_2\cos\varphi_2$. Пренебрегая угловой погрешностью и считая $\cos\varphi_2\approx\cos\varphi_1$, получаем $P_1=U_2I_2\cos\varphi_2k_uk_i=P_2k_ik_u=256\cdot30\cdot20=153{,}6$ кВт. Расход энергии за 8 ч работы $W_1=P_1t=153{,}6\cdot8=1228{,}8$ кВт·ч. Показание счетчика

$$W_2=\frac{W_1}{k_uk_i}=\frac{1228{,}8\cdot10^3}{30\cdot20}=2048\text{ Вт·ч}.$$

Условие 2. Полное сопротивление вторичной цепи трансформатора тока (вторичной обмотки и токовых катушек измерительных приборов) 3 Ом. Определить э. д. с. в первичной и во вторичной обмотках трансформатора тока. Определить также э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора тока, если эту обмотку разомкнуть.

Анализ и решение

При замкнутой вторичной обмотке э. д. с. в ней $E_2=I_2z_{2пол}=4\cdot3=12$ В. Коэффициент трансформации

$$k_i=\frac{I_1}{I_2}=\frac{E_2}{E_1}=\frac{100}{5}=20.$$

Следовательно, э. д. с. в первичной обмотке

$$E_1=\frac{E_2}{20}=\frac{12}{20}=0{,}6\text{ В}.$$

Трансформатор тока нормально работает в режиме, близком к короткому замыканию, напряжение на выводах вторичной обмотки близко к нулю. При разомкнутой вторичной обмотке ток в ней, размагничивающий трансформатор, становится равным нулю, а намагничивающий ток $I_1=I_2k_i=4\cdot20=80$ А остается прежним. Поэтому магнитный поток, а следовательно, э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора увеличатся примерно в k_i раз, т. е. $E_{20}=E_2k_i=12\cdot20=240$ В. Отсюда следует, что вторичную обмотку трансформатора тока нельзя размыкать в процессе работы; она должна быть замкнута либо накоротко, либо на малое сопротивление токовых катушек измерительных приборов.

Вопросы и упражнения к задачам 9-19 и 9-20

1. Трансформаторы напряжения 3000/100 В и тока 100/5 А (рис. 9-28) имеют соответственно числа витков в первичных обмот-

ках 9000 и 2. Определить числа витков во вторичных обмотках каждого трансформатора.

2. Автотрансформатор и однофазный трансформатор одинаковой мощности имеют по 500 витков в первичных обмотках. Определить, для какого из следующих чисел витков во вторичных обмотках: а) 100; б) 200; в) 300; г) 400 — потери в меди и количество меди для однофазного трансформатора будут в k раз больше, чем для автотрансформатора, $k=5$; 2,5; 1,67; 1,25.

9-21. Однофазный автотрансформатор $U_1/U_2=127/U_2$ В (рис. 9-27) имеет число витков $w_1=240$ и при полной нагрузке имеет ток во вторичной цепи $I_2=10$ А.

Допускаемая по условиям нагрева плотность тока в обмотках трансформатора $\delta=2$ А/мм². Напряжение на выводах электроприемника U_2 принять равным 100 и 50 В. Током холостого хода трансформатора пренебречь.

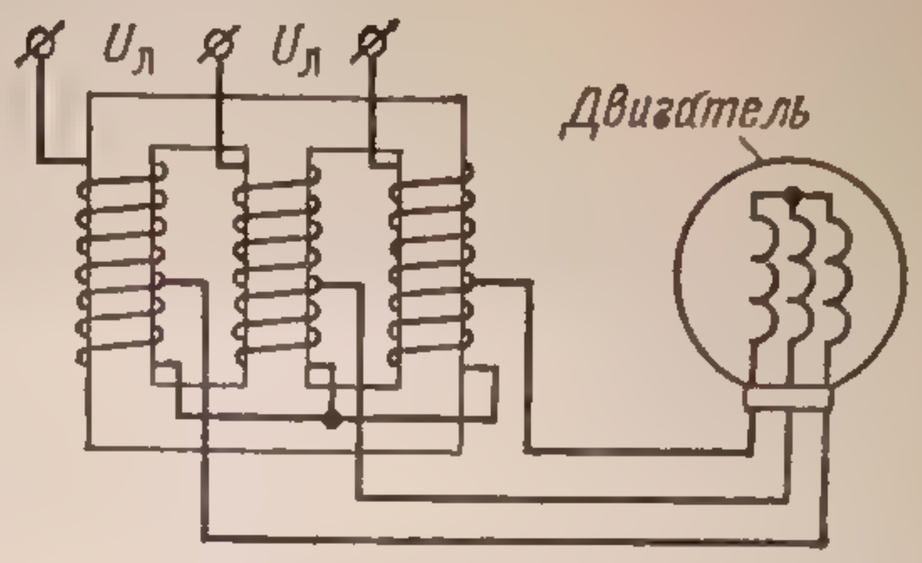


Рис. 9-29. К задаче 9-22.

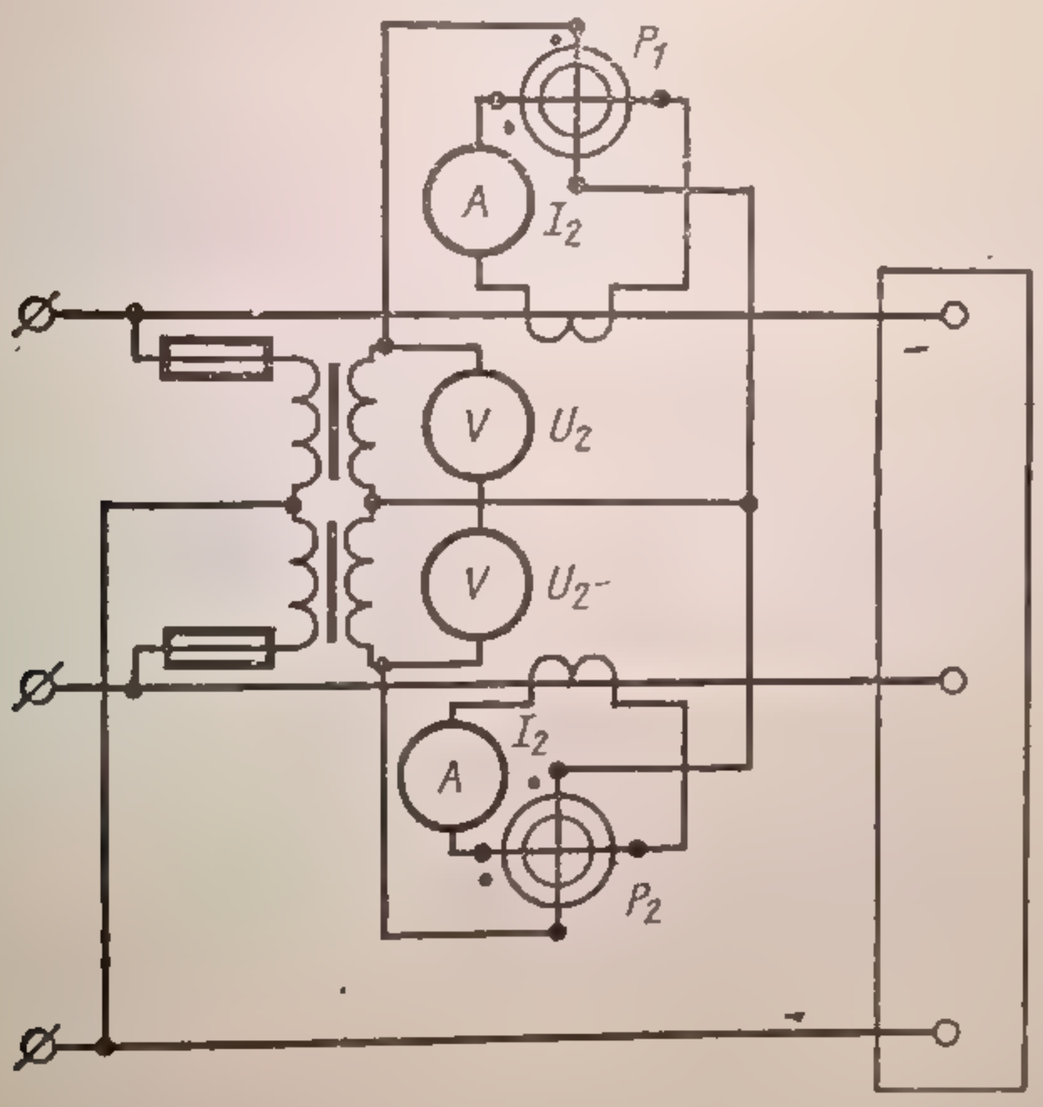


Рис. 9-30. К задачам 9-24, 9-25.

Определить ток I_1, число витков w_2, сечение проводников обмотки S_1 на участке с числом витков w_1-w_2 и S_2 на участке с числом витков w_2.

9-22. К трехфазному двигателю переменного тока, обмотки которого соединены в звезду, подводится при пуске пониженное напряжение через автотрансформатор (рис. 9-29). Определить линейный ток в сети (ток в первичной обмотке автотрансформатора),

если известно, что коэффициент трансформации равен 1,73, а линейный ток двигателя при непосредственном включении его в сеть равен 60 А.

9-23. Определить напряжение, ток, мощность и расход энергии за 8 ч работы в однофазной цепи переменного тока, если показания измерительных приборов, включенных через трансформаторы напряжения 400/100 В и тока 50/5 А (рис. 9-28) будут $U_2=95$ В, $I_2=4$ А, $P_2=330$ Вт. Определить также, каким было показание счетчика гектоватт-часов до начала работы, если показание его к концу работы оказалось 0020,1 гВт·ч.

9-24. Мощность трехфазного двигателя определяется по сумме показаний двух ваттметров, включенных через трансформаторы напряжения и тока, как показано на рис. 9-30. Коэффициенты трансформации: трансформатора напряжения $\sqrt{3}$, трансформатора тока 40. Показания приборов (рис. 9-30): $U_2=220$ В; $I_2=4{,}5$ А; $P'=980$ Вт; $P''=470$ Вт. Определить напряжение и ток в трехфазной сети (линейные), мощность и $\cos\varphi$ двигателя.

9-25. Решить предыдущую задачу по тем же данным, но при других показаниях ваттметров: $P_1=855$ Вт, $P_2=0$.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10-1. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СТАТОРА. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

10-1*. Вычертить в поперечном разрезе схемы катушечной обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя по следующим данным: число полюсов двигателя $2p=4$, число пазов на полюс и фазу $q=1$. Определить для указанной обмотки частоту вращения магнитного поля статора, если обмотка соединена: 1) в звезду; 2) в треугольник — и присоединена к трехфазной сети с частотой $f=50$ Гц.

Указать на схемах обмотки направления токов в проводниках и вычертить линии результирующего магнитного поля для моментов времени, когда $\omega t_1=\pi/2$ и $\omega t_2=5\pi/6$.

Мгновенные значения линейных токов изменяются по закону:

$$i_1 = I_M \sin \omega t; \quad i_2 = I_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_3 = I_M \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Анализ и решение

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора.

Статор в виде полого цилиндра собирается для уменьшения потерь от вихревых токов из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали. С внутренней стороны статор имеет пазы, в которые закладывается обмотка.

Для построения катушечной обмотки нужно определить общее число пазов и шаги обмотки.

Шагом по фазе $y_ф$ называется расстояние, измеренное числом пропущенных зубцов (пазов) от начала одной фазы до начала следующей фазы по ходу обмотки. Шагом по катушке $y_к$ называется расстояние, измеренное числом пропущенных пазов от начала катушки данной фазы до конца той же катушки.

Число пазов на полюс и фазу для трехфазной обмотки $q=\frac{z}{2p\cdot 3}$ выражает также число секций в катушке. Для односекционной обмотки ($q=1$) число катушек на фазу равно числу пар полюсов $k_ф=p$. Общее число катушек трехфазной обмотки $k=3k_ф=3p$.

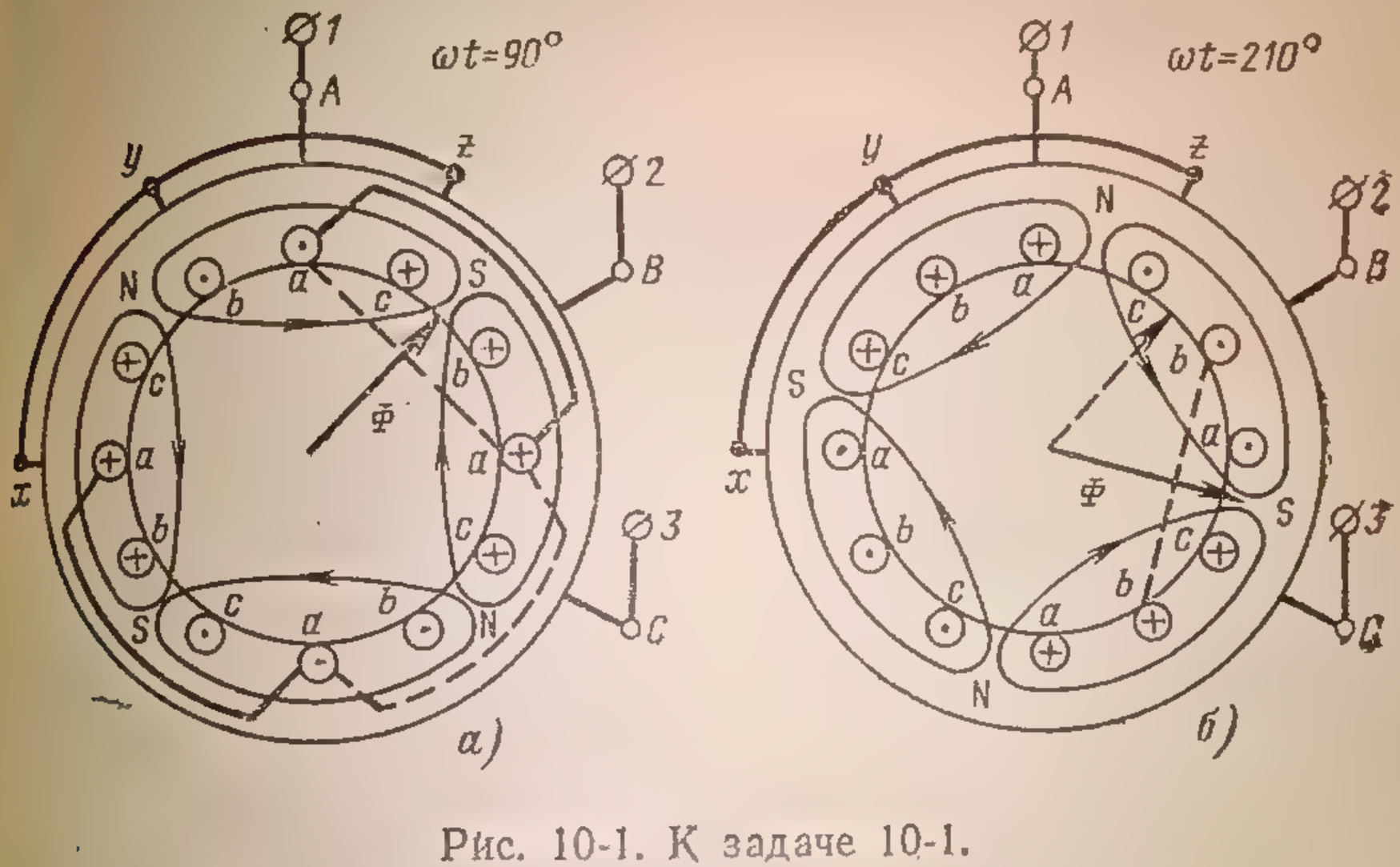


Рис. 10-1. К задаче 10-1.

Каждая секция (катушка) занимает два паза, следовательно, $z=2k=6p$. Три соседние катушки, принадлежащие разным фазам, занимают по окружности статора двойное полюсное деление $2\tau=\frac{z}{2p}=\frac{6p}{p}=6$ (см. рис. 10-1; 10-4; 10-5). Следовательно, три стороны катушек разных фаз, после которых идет вторая сторона катушки первой фазы, занимают полюсное деление $\tau=3$. Это и есть шаг по катушке $y_к=\tau=3$. Так как три катушки разных фаз занимают двойное полюсное деление, то расстояние между двумя соседними катушками или шаг по фазе $y_ф=\frac{1}{3}\cdot 2\tau y_ф=\frac{1}{3}\cdot 6=2$.

Таким образом, для трехфазной обмотки $k_ф=p=2$; $k=3k_ф=6$; $z=6p=12$; $y_к=3$ и $y_ф=2$.

Катушечная обмотка статора, вычерченная по полученным данным, представлена на рис. 10-1, *а* и *б*. Обмотка статора соединена в звезду.

Кривые изменения токов в проводах трехфазной сети показаны на рис. 10-2. Мгновенные значения токов в фазах обмотки i_A, i_B, i_C равны соответственно мгновенным значениям линейных токов i_1, i_2, i_3. Примем за положительное напряжение токов в катушках направление из сети к началам фаз A, B, C.

Для момента времени, когда $\omega t_1 = \pi/2$ (рис. 10-2), $i_1 = i_A > 0$; $i_2 = i_B < 0$; $i_3 = i_C < 0$. Для этого момента времени направления мгновенных токов показаны в проводниках обмотки статора на рис. 10-1, *а*. Там же показаны линии магнитного поля, направления которых определены по правилу буравчика. Из центра окружности статора проведен вектор магнитного потока, который для момента положительного максимума тока в фазе A ($\omega t_1 = \pi/2$) направлен перпендикулярно к плоскости катушки этой фазы.

Через $1/3$ периода $\omega t_2 = \dfrac{\pi}{2} + \dfrac{2\pi}{3} = \dfrac{7\pi}{3}$; $i_1 = i_A < 0$; $i_2 = i_B > 0$; $i_3 = i_C < 0$. Соответствующее построение выполнено на рис. 10-1, *б*. При этом вектор магнитного потока занимает новое положение; он

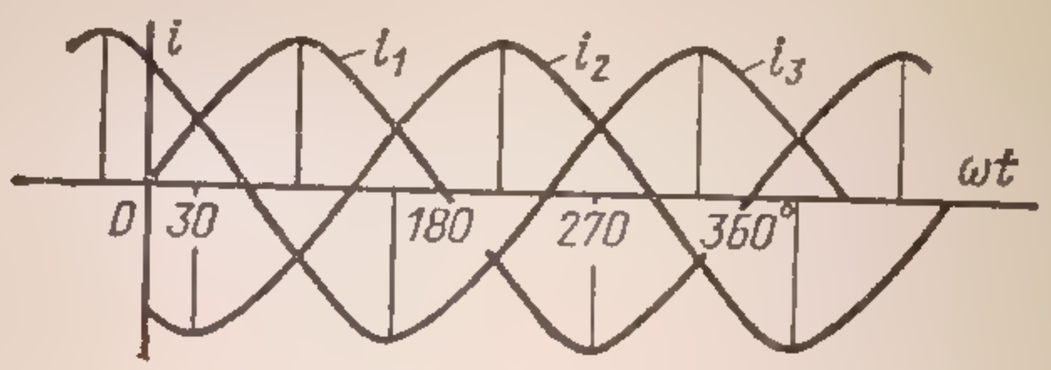


Рис. 10-2. К задаче 10-1.

перпендикулярен к плоскости катушки фазы B, в которой теперь ток имеет положительное и максимальное значение.

Еще через $1/3$ периода вектор магнитного потока займет положение, перпендикулярное к плоскости катушки фазы C. Вычертив распределение токов в обмотке статора и линии магнитного поля для любого другого момента времени, легко убедиться в том, что вектор магнитного потока вращается, описывая за полный период дугу по окружности статора, на которой расположены три катушки разных фаз. Таким образом, получается *вращающееся магнитное поле*. Так как по всей окружности статора расположены $k = 3p$ катушек, три катушки занимают по статору $1/p$ часть окружности. Следовательно, за один период магнитное поле сделает $1/p$ часть оборота. При частоте переменного тока f, Гц, частота вращения магнитного поля статора, выраженная числом оборотов в минуту, будет $n_1 = 60f/p$. В условиях данной задачи $n_1 = 60 \cdot 50/2 = 1500$ об/мин.

Направление вращения магнитного поля статора будет зависеть от последовательности прохождения тока в фазах обмотки через максимальные значения. В данном случае эта последовательность имеет место от фазы A к B и далее к C, и магнитное поле вращается по часовой стрелке. Пересоединив выводы двух фаз, например фазу B к проводу *3* и фазу C к проводу *2*, мы изменим последовательность прохождения тока через максимальные значения, и направление вращения магнитного поля изменится на обратное.

При соединении обмотки статора в треугольник изменятся только значения фазных и линейных токов, частота вращения магнитного поля статора останется неизменной.

10-2*. Для обмотки статора, изображенной на схеме рис. 10-3, определить число полюсов $2p$ магнитного поля статора; направление и частоту вращения поля n_1, об/мин; число пазов статора z_1; число пазов на полюс и фазу q; полюсное деление τ; шаги обмот-

ки по фазе $y_ф$ и по катушке $y_к$; число катушечных групп на фазу $k_ф$ и общее число катушечных групп k.

Определить также э. д. с. E_1, индуктированную в одной фазе обмотки статора, если максимальный магнитный поток $Ф_м=0{,}15$ Вб, обмоточный коэффициент $k_1=0{,}96$, частота $f=50$ Гц.

Анализ и решение

Обмотка, изображенная на рис. 10-3, четырехсекционная, $q=4$. Общее число катушечных групп $k=3$ по четыре секции в каждой группе, но $k=3p$ (см. решение задачи 10-1), следовательно, для обмотки рис. 10-3 $p=1$, число катушечных групп на фазу $k_ф=p=1$ и число полюсов машины $2p=2$. Частота вращения магнитного поля статора $n_1=60f/p=60\cdot50/1=3000$ об/мин.

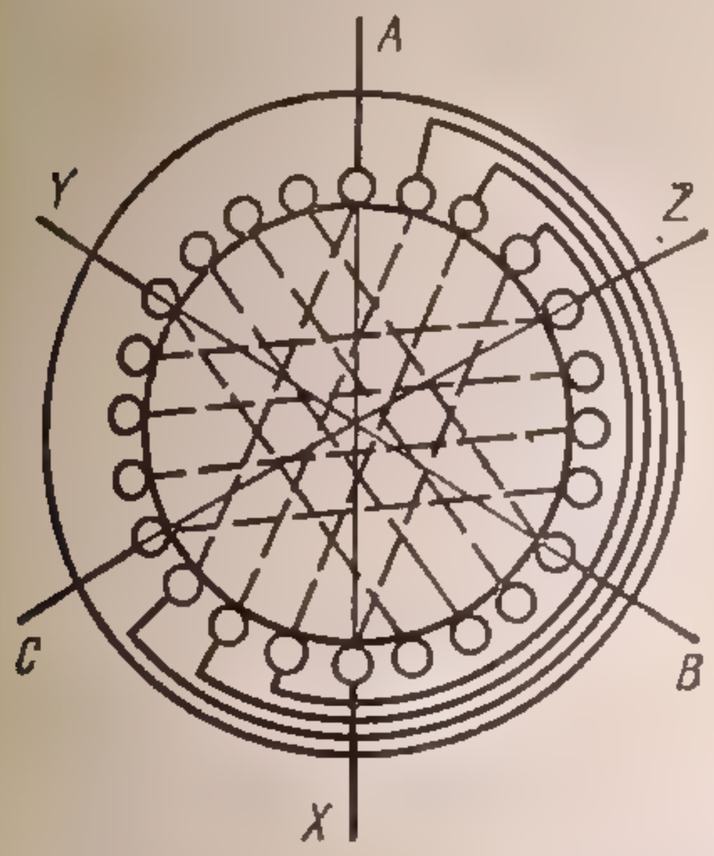


Рис. 10-3. К задаче 10-2.

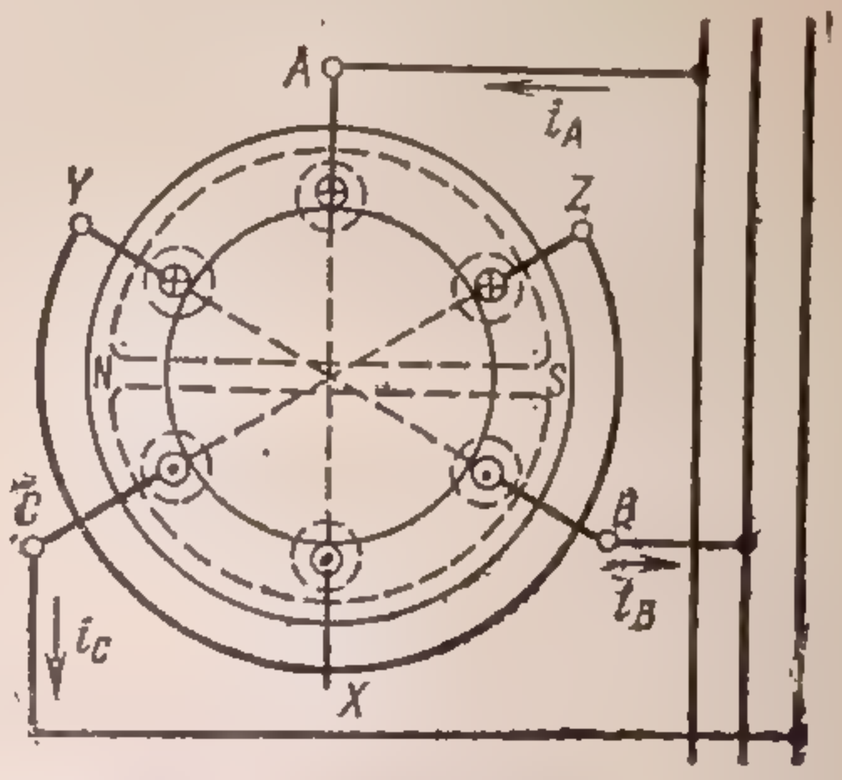


Рис. 10-4. К задачам 10-1, 10-2.

По сравнению с односекционной обмоткой число пазов и шаги обмотки нужно увеличить в q раз. Поэтому (см. решение задачи 10-1) $z_1=6pq=6\cdot1\cdot4=24$; $y_к=3q=12$; $y_ф=2q=8$.

Действующее значение э. д. с., индуктированной в фазе обмотки статора, определяется так же, как для трансформатора, но с введением обмоточного коэффициента, учитывающего векторное сложение не совпадающих в общем случае по фазе э. д. с., индуктированных вращающимся полем в последовательно соединенных витках (секциях) катушечной группы данной фазы обмотки.

Таким образом, формула для определения э. д. с. в одной фазе статора получит вид:

$$E_1=0{,}44f\Phi_м w_1 k_1,$$

где k_1 — обмоточный коэффициент.

Подставляя данные задачи, получаем:
$E_1=4{,}44\cdot50\cdot0{,}15\cdot4\cdot0{,}96=127$ В.

Вопросы и упражнения к задачам 10-1, 10-2

1. В какой части изменится решение задачи 10-1, если мгновенные значения фазных токов будут заданы следующими уравнениями:

$$i_A=I_м\sin\omega t;\quad i_B=I_м\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right);\quad i_C=I_м\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right).$$

2. Решить задачу 10-2 для обмотки статора, представленной на рис. 10-4. Обмоточный коэффициент $k_1 = 1$.

3. Решить задачу 10-2 для обмотки статора, представленной на рис. 10-5. Обмоточный коэффициент $k_1 = 1$.

4. Решить задачу 10-2 для обмотки статора, представленной на рис. 10-6. Обмоточный коэффициент $k_1 = 0{,}96$.

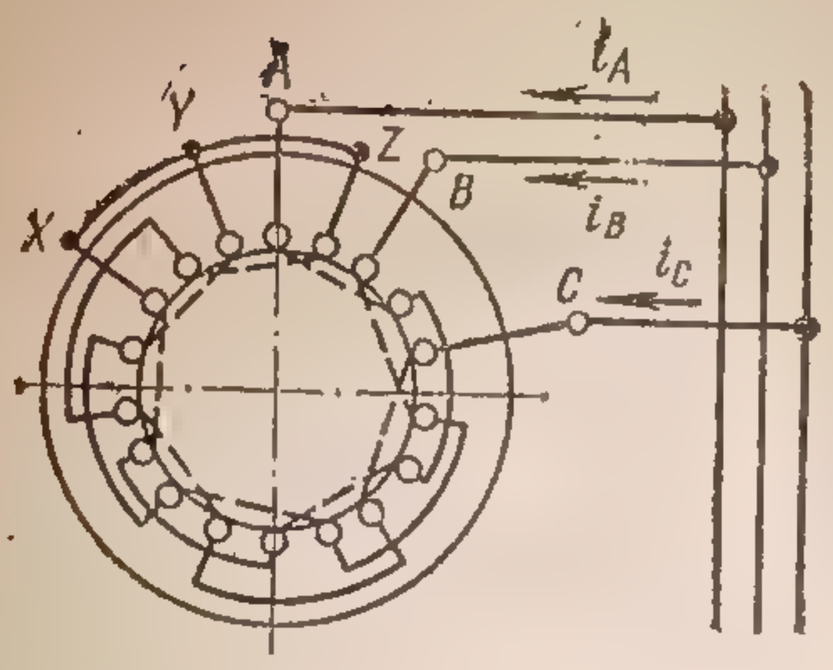


Рис. 10-5. К задачам 10-1, 10-2.

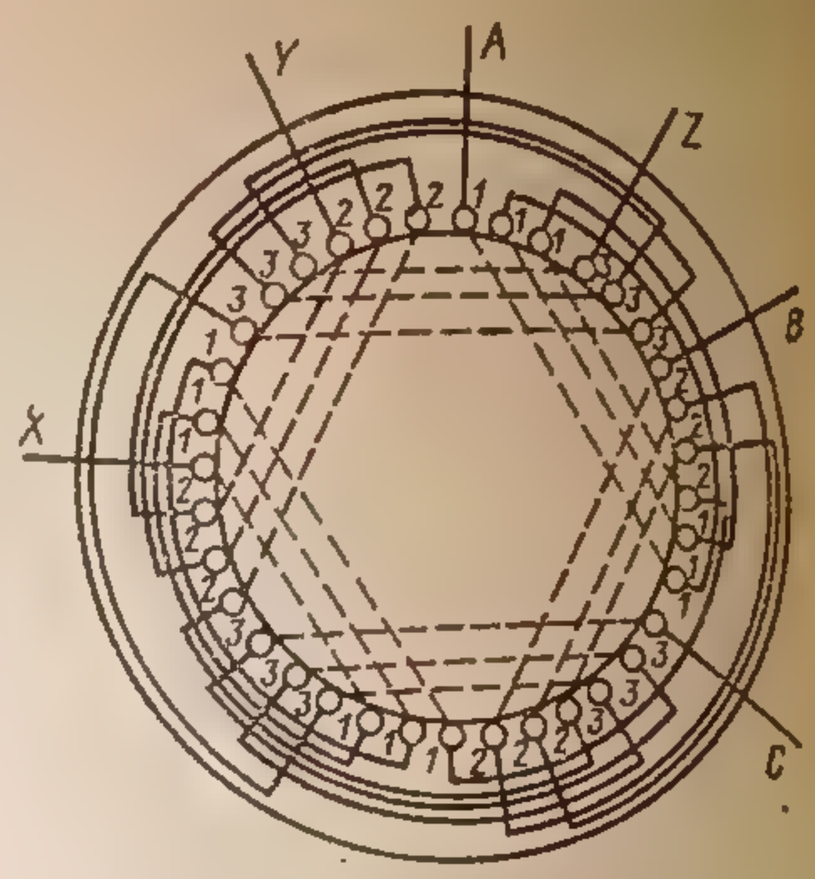


Рис. 10-6. К задачам 10-1, 10-2.

10-3. Для восьмиполюсной трехфазной обмотки статора рассчитать число пазов z, шаги обмотки по фазе $y_ф$ и по катушке $y_к$, число катушечных групп на фазу $k_ф$ и общее число катушечных групп k. Расчет выполнить для односекционной обмотки $q = 1$ и двухсекционной обмотки $q = 2$.

10-4*. Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель имеет скольжение s, изменяющееся от 0,5 до 4% при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Определить, в каких пределах будет изменяться частота вращения двигателя и частота тока ротора при частоте сети $f = 50$ Гц.

Анализ и решение

Вращающаяся часть двигателя — ротор представляет собой стальной барабан, собранный так же, как и статор, из тонких стальных листов. В пазы, расположенные на поверхности ротора, закладывается обмотка. Последняя бывает двух типов: короткозамкнутая в виде голых алюминиевых или медных стержней, замкнутых по торцам накоротко, или фазная, выполненная по типу статорной

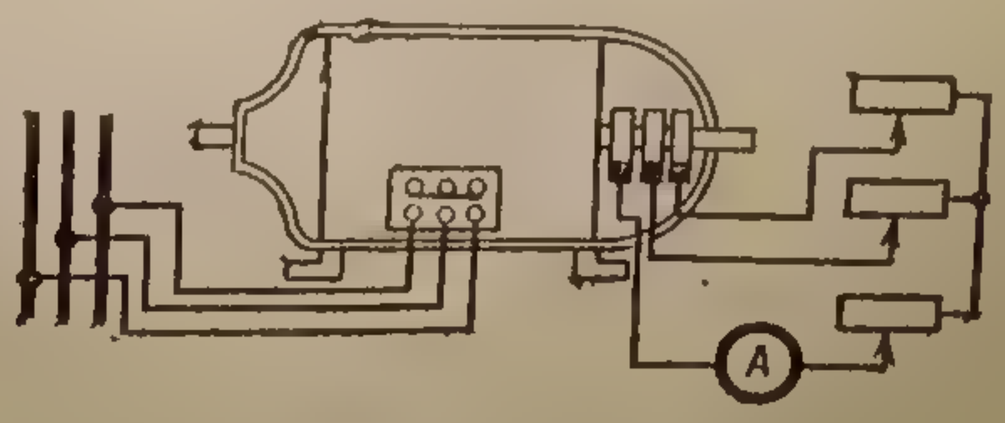


Рис. 10-7. К задаче 10-4.

обмотки из изолированных катушек. Обмотка фазного ротора соединяется в звезду, и свободные концы ее присоединены к трем кольцам, укрепленным на валу ротора. Через неподвижные щетки, наложенные на кольца, в цепь каждой фазы ротора может быть введен реостат (рис. 10-7).

На рис. 10-8 схематически изображен статор четырехполюсной машины с вставленным в него короткозамкнутым ротором. Токи, проходя по обмотке статора, образуют вращающееся магнитное поле. Для произвольного момента времени мгновенное синусоидальное распределение магнитной индукции по окружности статора условно показано на чертеже графически в виде заштрихованной эпюры.

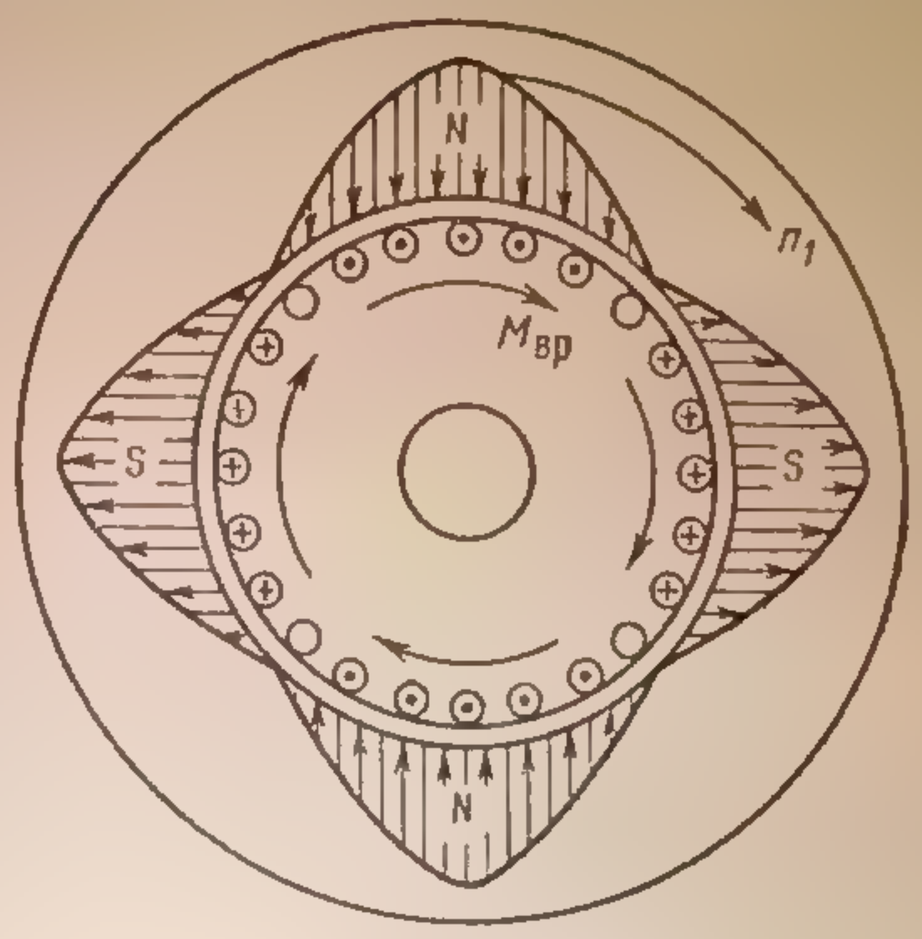


Рис. 10-8. К задаче 10-4.

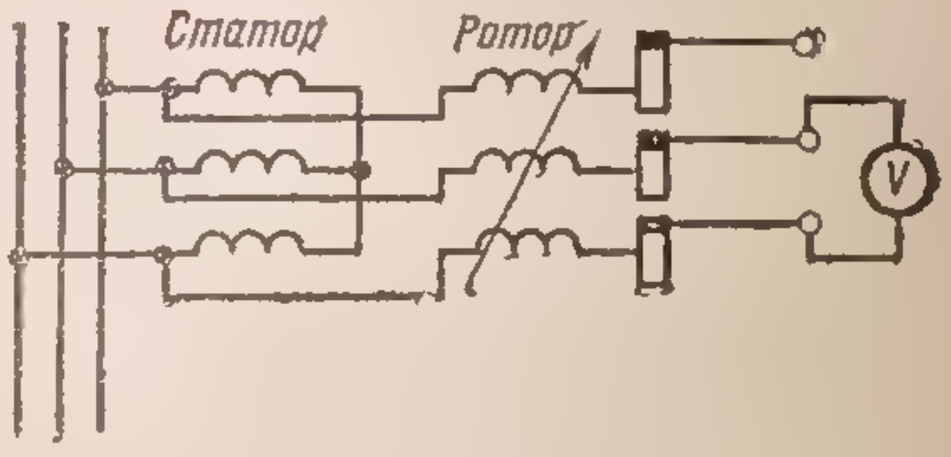


Рис. 10-9. К задаче 10-5.

При вращении магнитного поля с частотой n_1 в проводниках ротора будет индуктироваться э. д. с. и будут протекать токи. Для упрощения будем считать, что направления токов и э. д. с. ротора совпадают (правило правой руки). Тогда на проводники ротора будут действовать силы (правило левой руки), под действием которых ротор может начать вращаться в ту же сторону, куда вращается магнитное поле статора.

В момент пуска э. д. с. и ток ротора имеют наибольшие значения, а по мере раскручивания ротора уменьшаются. Уменьшение э. д. с. и тока ротора будут происходить до тех пор, пока убывающий вращающий момент не станет равным тормозящему, обусловленному механической нагрузкой. При этом частота вращения ротора n достигнет установившегося значения и будет несколько меньше, чем частота вращения магнитного поля n_1.

Степень отставания ротора от магнитного поля статора характеризуется скольжением $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ или в процентах $s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} 100$. Очевидно, что скольжение зависит от нагрузки двигателя, возрастая при ее увеличении.

• При $n = n_1$ э. д. с., ток ротора и вращающий момент равны нулю, чего не может быть даже при холостом ходе вследствие наличия трения в самом двигателе.

Частоты э. д. с. и тока ротора зависят от частоты его вращения. Магнитное поле статора за 1 мин совершает по отношению к вращающимся проводникам ротора $n_1 - n$ оборотов в минуту (число обгонов в минуту), а в секунду $\frac{n_1 - n}{60}$ оборотов. За каждый обгон э. д. с. и ток ротора проходят в общем случае p периодов (в нашем

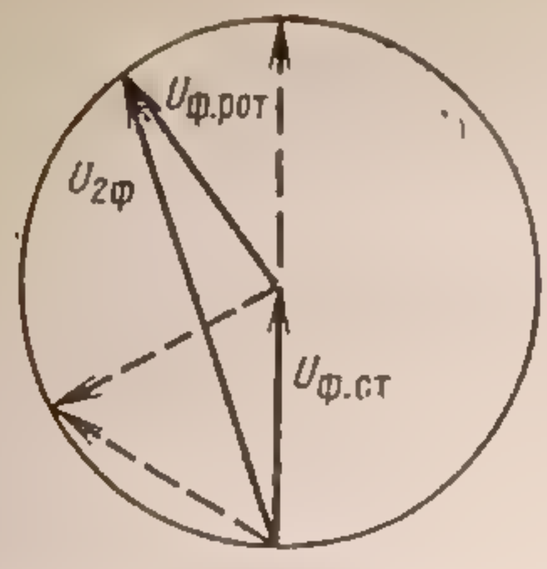


Рис. 10-10. К задаче 10-5.

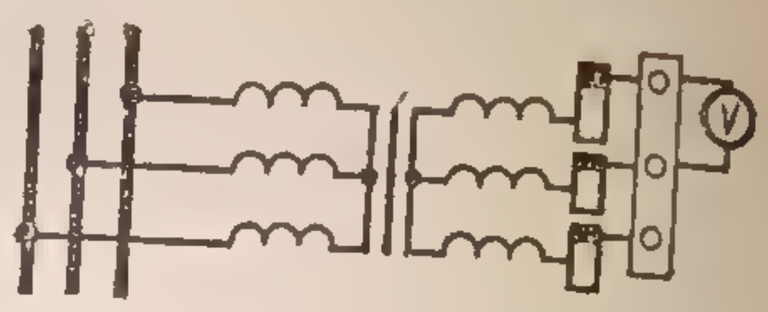


Рис. 10-11. К задаче 10-6.

примере $p=2$, рис. 10-8). Следовательно, частота тока и э. д. с. ротора $f_2 = p\frac{n_1 - n}{60}$, Гц. Умножая числитель и знаменатель полученного выражения на n_1, получаем $f_2 = \frac{pn_1}{60}\frac{n_1 - n}{n_1} = fs$, где f — частота тока в статоре.

Подставляя в полученные формулы числовые данные из условия задачи, получаем частоту вращения магнитного поля статора $n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50/2 = 1500$ об/мин, частота вращения ротора $n = n_1(1-s)$.

При холостом ходе $n_0 = 1500\ (1-0{,}005) = 1492{,}5$ об/мин; частота тока и э. д. с. ротора $f_{2.0} = fs_0 = 50 \cdot 0{,}005 = 0{,}25$ Гц. При нагрузке $n = 1500\ (1-0{,}04) = 1440$ об/мин; $f_2 = fs = 50 \cdot 0{,}04 = 2$ Гц.

10-5*. Для использования асинхронного двигателя с фазным ротором в качестве поворотного автотрансформатора (индукционного регулятора) с регулируемым напряжением на кольцах ротора фазы последнего, нормально соединенные в звезду, разъединяются и присоединяются к выводам статора, как указано на схеме рис. 10-9. Определить, в каких пределах будет изменяться напряжение на кольцах индукционного регулятора, если коэффициент трансформации э. д. с. равен единице и статор, обмотка которого соединена в звезду, получает питание от трехфазной сети с линейным напряжением 220 В. Построить также векторную диаграмму.

Анализ и решение

При повороте ротора на тот или иной угол изменяется фаза напряжения ротора при неизменной фазе напряжения статора. Фазное вторичное напряжение равно векторной сумме фазных напряжений статора и ротора, $\bar{U}_{2ф} = \bar{U}_{ф.ст} + \bar{U}_{ф\ рот}$ (рис. 10-10).

Линейное вторичное напряжение (напряжение на кольцах) будет в $\sqrt{3}$ раз больше.

При коэффициенте трансформации э. д. с., равном единице,

$$U_{ф.ст} = U_{ф.рот} = 220/\sqrt{3} = 127 \text{ В}.$$

Минимум вторичного фазного напряжения получится, когда напряжения $U_{ф.ст}$ и $U_{ф.рот}$ находятся в противофазе, тогда $U_{2ф} = U_{ф.ст} - U_{ф.рот} = 0$.

Максимум вторичного фазного напряжения получится, когда $U_{ф.ст}$ и $U_{ф.рот}$ совпадают по фазе, тогда $U_{2ф} = U_{ф.ст} + U_{ф.рот} = 127 + 127 = 254$ В.

Напряжение на кольцах (линейное) будет в $\sqrt{3}$ раз больше:

$$U_{2л} = \sqrt{3} \cdot 254 = 440 \text{ В}.$$

Следовательно, за полный оборот ротора напряжение на кольцах будет изменяться от 0 до 440 В.

Упражнения к задаче 10-4, 10-5

1. Решить задачу 10-4 при условии, что частота $f = 60$ Гц.

2. Для преобразования частоты ротор трехфазного шестиполюсного асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой на кольцах (рис. 10-11) приводится во вращение от постороннего двигателя с частотой n, выраженной одним из следующих чисел, об/мин: а) +500; б) —1000; в) —3000; г) —4000. Отрицательная частота вращения показывает, что ротор вращается в сторону, обратную вращению магнитного поля статора. Определить, при какой из указанных частот вращения частота напряжения на кольцах преобразователя будет 250; 200; 100; 25 Гц.

10-6. Трехфазный асинхронный двигатель с заторможенным фазным ротором используется в качестве фазорегулятора[1] (рис. 10-11). Обмотка статора его содержит 80 проводников в каждой фазе и получает питание от трехфазной сети с линейным напряжением $U_1 = 220$ В при частоте 50 Гц. Обмотка ротора соединена в звезду и содержит в каждой фазе 50 проводников.

Считая обмоточный коэффициент одинаковым для обеих обмоток, определить коэффициент трансформации э. д. с. и напряжение на кольцах разомкнутого ротора фазорегулятора при соединении обмотки статора в звезду и в треугольник.

10-2. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

10-7*. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя, приведенный к трехфазному[2], имеет на фазу активное сопротивление

---

[1] Заторможенный асинхронный двигатель с фазным ротором представляет собой трансформатор. Поворачивая ротор на тот или иной угол, можно изменять фазу вторичного напряжения (напряжения на концах), сохраняя его значение.

[2] Ротор короткозамкнутого двигателя является многофазным, так как э. д. с., индуктированные в проводах ротора, сдвинуты по фазе одна относительно другой. Однако в расчетах такой ротор может быть заменен эквивалентным трехфазным, имеющим, так же как и статор, трехфазную обмотку.

$r_{2.ф}=0{,}05$ Ом, реактивное сопротивление неподвижного ротора $x_{2н}=0{,}2$ Ом. Электродвижущая сила фазы неподвижного ротора $E_{2н}=20{,}5$ В. Двигатель четырехполюсный и питается от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц. Построить кривые тока ротора I_2 и $\cos\psi_2$ в функции скольжения и, пользуясь ими, построить также график зависимости вращающего момента $M_{вр}$ от скольжения двигателя.

Анализ и решение

Ток фазы ротора может быть определен по формуле $I_2=\frac{E_2}{z_2}=\frac{E_2}{\sqrt{r_2^2+x_2^2}}$, где э. д. с. фазы ротора E_2 определяется, как для трансформатора: $E_2=4{,}44f_2\Phi_м w_2 k_2$ (k_2 — обмоточный коэффициент). Выражая частоту тока ротора через частоту сети $f_2=fs$ и учитывая, что при $s=1$ $E_{2н}=4{,}44f\Phi_м w_2 k_2$ выражает э. д. с. неподвижного ротора, получаем $E_2=E_{2н}s$.

Аналогично выразим реактивное сопротивление фазы ротора $x_2=2\pi f_2 L_2=2\pi fsL_2=x_{2н}s$, где $x_{2н}$ — реактивное сопротивление неподвижного ротора.

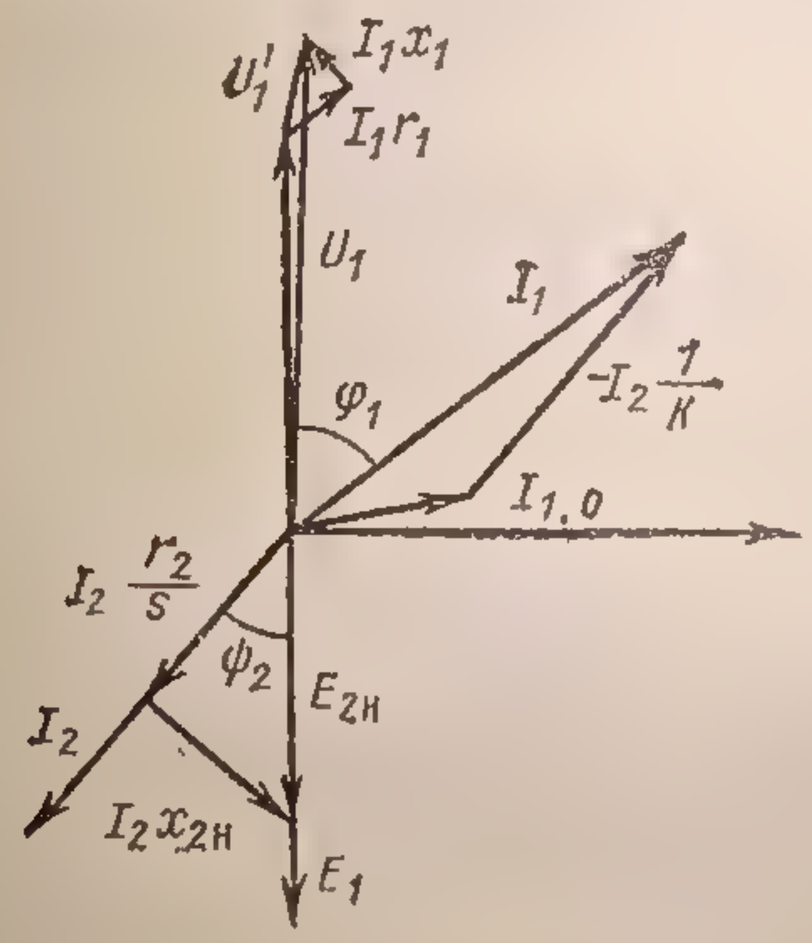


Рис. 10-12. К задаче 10-7.

Тогда получим:

$$I_2=\frac{E_{2н}s}{\sqrt{r_2^2+s^2x_{2н}^2}}.$$

Разделив числитель и знаменатель выражения на s, будем иметь:

$$I_2=\frac{E_{2н}}{\sqrt{(r_2/s)^2+x_{2н}^2}}. \quad (1)$$

Операция деления числителя и знаменателя на s имеет тот смысл, что мы заменяем вращающийся ротор с активным сопротивлением фазы r_2 и частотой f_2 эквивалентным неподвижным ротором с активным сопротивлением фазы r_2/s и частотой тока f_1, равной частоте сети. Векторная диаграмма для такого асинхронного двигателя представлена на рис. 10-12 и имеет такой же вид, как для трансформатора, вторичная обмотка которого замкнута накоротко.

Из векторной диаграммы асинхронного двигателя следует:

$$E_{2н}\cos\psi_2=I_2\frac{r_2}{s},$$

где ψ_2 — угол сдвига фаз между током и э. д. с. ротора, причем

$$\cos\psi_2=\frac{r_2/s}{\sqrt{(r_2/s)^2+x_{2н}^2}}. \quad (2)$$

Электромагнитная мощность, переданная ротору,

$$P_{вр} = 3E_{2п} I_2 \cos \psi_2 = 3I_2^2 \frac{r_2}{s} = M_{вр} \omega_1, \qquad (3)$$

где ω_1 — угловая скорость вращающегося магнитного поля статора:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot 60f}{60p} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega}{p}.$$

Вращающий момент двигателя теперь выразится:

$$M_{вр} = \frac{3I_2^2 r_2 p}{s\omega}; \qquad (4)$$

По условию задачи число пар полюсов двигателя $p=2$, угловая частота $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с, $r_ф = 0{,}05$ Ом и $x_{2п} = 0{,}2$ Ом, $E_{2п} = 20{,}5$ В. Поэтому, подставляя в формулы (1), (2), (4) числовые данные, получаем требуемые значения.

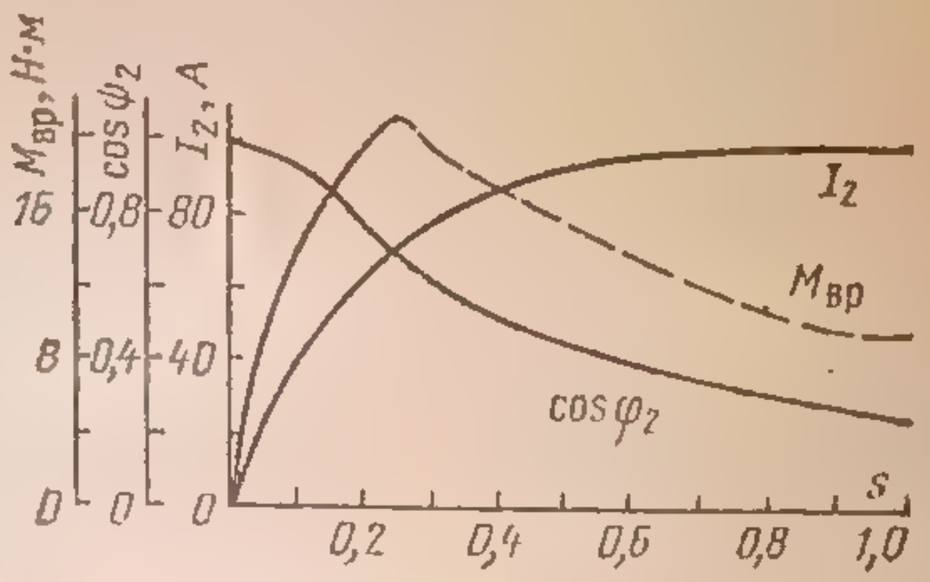


Рис. 10-13. К задаче 10-7.

Результаты расчета для разных скольжений от нуля до единицы записаны в таблицу. По этим данным построены кривые рис. 10-13.

s	I_2, А	$\cos\psi_2$	$M_{вр}$, Н·м	Режим работы
0	0	1	0	Идеальный холостой ход
0,05	20	0,98	7,6	Нагрузка
0,1	38	0,93	13,8	
0,15	52,5	0,86	17,6	
0,2	64	0,78	19,5	
0,25	73	0,78	19,5	Максимальная нагрузка
0,3	79	0,64	19,8	Пусковой режим
0,5	91,5	0,447	15,7	
1	100	0,243	9,54	

Ординаты кривой вращающего момента могут быть получены, если перемножить числа, выражающие ординаты кривых $I_2 \cos \psi_2$.

Пропорциональность вращающего момента произведению $I_2 \cos \psi_2$ вытекает из уравнения (3), в котором $\omega_1 = \text{const}$ и $E_{2п}$ можно также считать величиной приблизительно постоянной, пропорциональной магнитному потоку, который, как у трансформатора, опре-

деляется неизменным напряжением трехфазной сети U_1, приложенным к первичной обмотке, т. е. к статору. Таким образом, выражение для вращающего момента может быть представлено в виде

$$M_{вр} = c\Phi_м I_2 \cos\psi_2, \tag{5}$$

где c — постоянная, зависящая от конструктивных данных двигателя. Из выражения (5) следует также, что вращающий момент двигателя приблизительно пропорционален квадрату напряжения U_1. Действительно, I_2 пропорционален $E_{2н}$, которая пропорциональна $\Phi_м$. Следовательно, $M_{вр}$ пропорционален $\Phi_м^2$ или U_1^2.

Как видно из характеристик двигателя, при пуске его ($s=1$) $\cos\psi_2$ — низкий, что обусловлено весьма значительным реактивным сопротивлением неподвижного ротора[1]. Поэтому, несмотря на большой пусковой ток, вращающий момент сравнительно невелик и пуск двигателя нельзя осуществить при большой нагрузке. По мере раскручивания ротора ток уменьшается, $\cos\psi_2$ увеличивается, а вращающий момент сначала увеличивается, при некотором скольжении достигает максимума, а затем уменьшается до значения, определяемого механической нагрузкой двигателя.

Таким образом, $\cos\psi_2$ и ток I_2 зависят от механической нагрузки двигателя. С другой стороны, как видно из векторной диаграммы, всякое изменение тока I_2 вызывает соответствующее изменение тока I_1. Следовательно, ток статора I_1 также зависит от механической нагрузки.

10-8*. Короткозамкнутый трехфазный асинхронный двигатель единой серии АО2-32-4 имеет следующие технические данные.

Номинальная мощность на валу $P_н = 3$ кВт; частота вращения ротора $n_н = 1420$ об/мин, к. п. д. $\eta_н = 83{,}5$; коэффициент мощности $\cos\varphi_н = 0{,}84$.

Кратности: пускового тока 7, максимального момента 2,2 и пускового момента 1,8.

Определить число полюсов двигателя $2p$, скольжение s, момент нагрузки $M_н$, максимальный момент $M_{макс}$, пусковой момент $M_{пуск}$, номинальный и пусковой токи двигателя $I_{ном}$ и $I_{пуск}$ при соединении обмотки статора в звезду и в треугольник. Двигатель рассчитан на напряжение сети 220/380 В и частоту 50 Гц.

Анализ и решение

Если указано, что двигатель может работать от сети с напряжением 220/380 В, это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220 В. Поэтому если в сети линейное напряжение 220 В, то обмотка статора должна быть соединена в треугольник. При напряжении в сети 380 В обмотка статора соединяется в звезду.

Число полюсов указано в обозначении типа двигателя, $2p = 4$.

Частота вращения магнитного поля статора $n_1 = \dfrac{60f}{p} = \dfrac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ об/мин.

---

[1] Реактивное сопротивление ротора обусловлено магнитным потоком рассеяния, который у асинхронного двигателя весьма значителен вследствие наличия воздушного зазора. В условии задачи $x_{2н}/r_2 = 0{,}2/0{,}05 = 4$.

Теперь можно определить скольжение при номинальной нагрузке:

$$s_н = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0{,}05, \text{ или } 5\%.$$

Мощность двигателя на валу связана с номинальным моментом нагрузки формулой

$$P = M_н \omega = M \frac{2\pi n}{60},$$

отсюда $M_н = \frac{P}{2\pi n/60}$. Если мощность выражена в Вт, угловая скорость $\omega = 2\pi n/60$ в рад/с, то момент будет в Н·м.

Таким образом, $M_н = 60P/2\pi n = 9{,}55P/n$.

Подставляя числовые данные, получаем $M_н = 9{,}55 \frac{3000}{1420} =$ $= 20$ Н·м, или, учитывая, что 1 Н·м $= 0{,}102$ кгс·м, получаем $M_н =$ $= 2{,}06$ кгс·м.

Заданные в условии задачи кратности показывают отношение значений этих величин к их номинальным значениям. Поэтому максимальный момент $M_{макс} = M_н \cdot 2{,}2 = 44$ Н·м (4,5 кгс·м), пусковой момент $M_{пуск} = M_н \cdot 1{,}8 = 36$ Н·м (3,67 кгс·м).

Мощность, подводимая к двигателю из сети,

$$P_1 = \frac{P}{\eta} = \frac{3}{0{,}835} = 3{,}60 \text{ кВт}.$$

Теперь из выражения $P_1 = \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi_1$ можно определить номинальный ток двигателя.

При напряжении в сети 220 В обмотка статора соединена в треугольник и линейный номинальный ток двигателя будет:

$$I_{1лΔ} = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{1л} \cos \varphi_1} = \frac{3600}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0{,}84} = 11{,}3 \text{ А}.$$

При напряжении в сети 380 В обмотка статора соединена в звезду и линейный номинальный ток двигателя будет:

$$I_{1лY} = \frac{3600}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}84} = 6{,}6 \text{ А}.$$

Умножая полученные токи на кратность пускового тока, получаем пусковые токи:

$$I_{пускΔ} = 79 \text{ А и } I_{пускY} = 46 \text{ А}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 10-7 и 10-8

1. При каком режиме работы двигателя $\cos \varphi_1$ получится самым низким (φ_1 — угол сдвига фаз между током и напряжением статора). Как будет изменяться $\cos \varphi_1$ при увеличении механической нагрузки двигателя?

2. Определить, можно ли осуществить пуск в ход двигателя, технические данные которого приведены в задаче 10-8, при полной

нагрузке и номинальном напряжении, а также при снижении напряжения в сети на 30%? Определить для этого случая кратности пускового момента $M_{пуск}/M_н$ и пускового тока $I_{пуск}/I_н$.

Указание. При решении задачи исходить из того, что момент двигателя пропорционален квадрату напряжения сети, а ток пропорционален напряжению в первой степени.

3. Трехфазный асинхронный двигатель имеет технические данные, представленные в задаче 10-8.

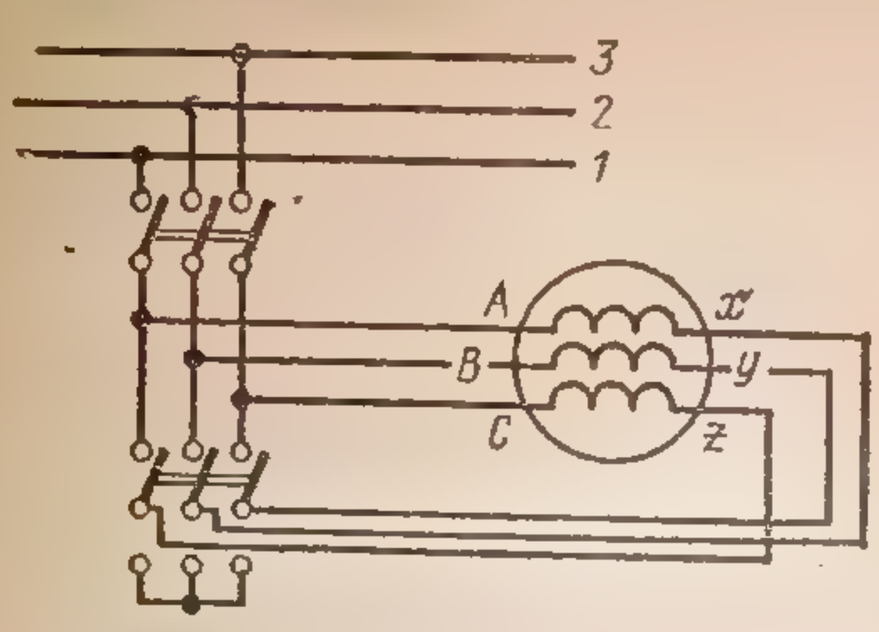


Рис. 10-14. К задачам 10-7, 10-8.

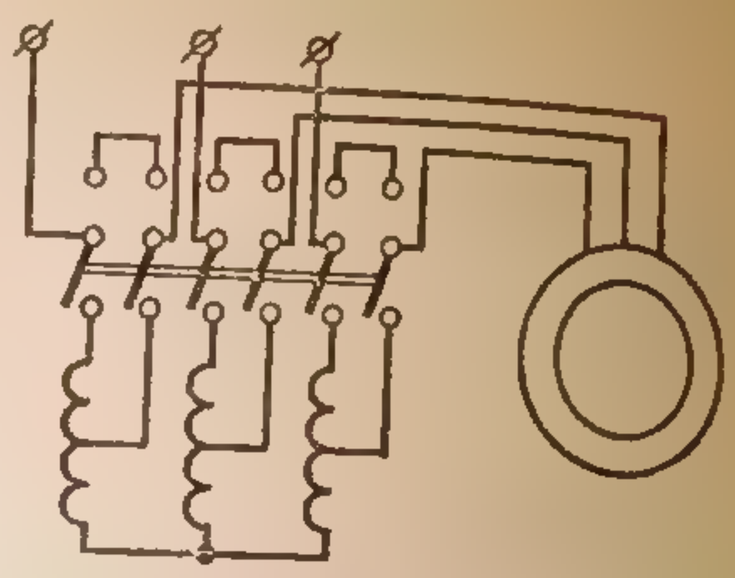


Рис. 10-15. К задачам 10-7, 10-8.

Двигатель присоединен к трехфазной сети с линейным напряжением 220 В. Определить, как изменятся пусковой ток и пусковой момент, если пуск осуществляется путем переключения статора со звезды на треугольник (рис. 10-14). Возможен ли при этом пуск двигателя в ход при полной и при 50%-ной нагрузках?

4. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает в нормальных условиях при соединении обмотки статора в треугольник. Пуск двигателя осуществляется путем переключения статора со звезды на треугольник (рис. 10-14). Определить, возможен ли пуск двигателя в ход при 50%-ной и при 25%-ной нагрузке, если кратность пускового момента при номинальной нагрузке и номинальном фазовом напряжении статора равна 1,2.

5. Короткозамкнутый трехфазный асинхронный двигатель с кратностью пускового момента 1,7 и кратностью пускового тока 5,5 пускается в ход при половинной нагрузке. Пуск осуществляется посредством автотрансформатора (рис. 10-15), дающего снижение пускового тока в проводах сети в 2,25 раза. Определить коэффициент трансформации автотрансформатора и установить, возможен ли при этом пуск двигателя в ход.

6. Пуск двигателя с данными, указанными в примере 5, осуществляется посредством реостата, включаемого последовательно в цепь статора (рис. 10-16) и дающего снижение пускового тока в 2,25 раза (такое же, как в упражнении 5). Определить, возможен ли в этом случае пуск двигателя в ход.

7. При повороте характеристики двигателя $M=f(s)$ (рис. 10-13) по часовой стрелке на 90° получится механическая характеристика двигателя $n=f(M)$ (рис. 10-17). Определить, при каком из тормозных моментов: а) 8; б) 10; в) 15; г) 20 Н·м — возможен пуск двигателя.

8. По механической характеристике двигателя определить, при какой из указанных частот вращения возможна устойчивая работа двигателя: а) 500; б) 700; в) 900; г) 1100 об/мин.

10-9. Решить задачу 10-8 для трехфазных асинхронных двигателей единой серии, технические данные которых представлены в приведенной ниже таблице. Двигатель рассчитан на напряжение сети 220/380 В.

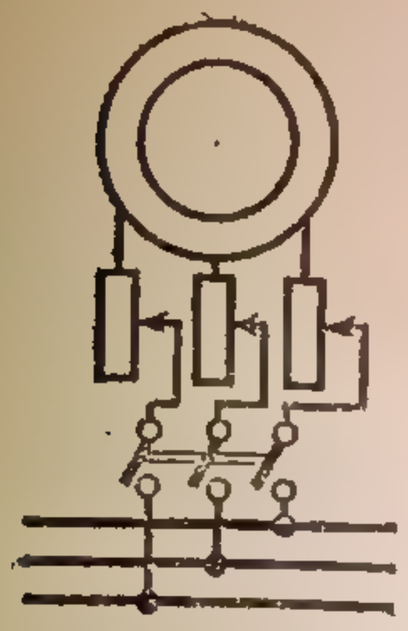


Рис. 10-16. К задачам 10-7, 10 8.

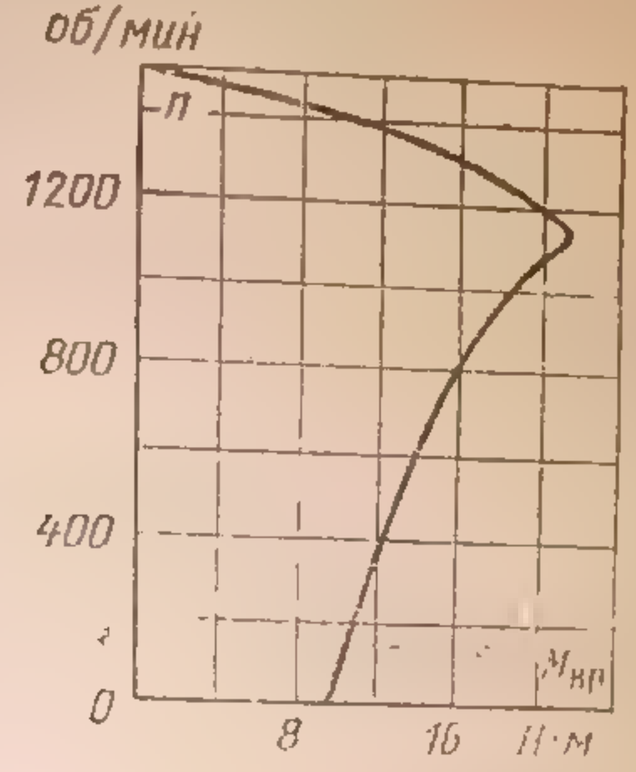


Рис. 10-17. К задачам 10-7. 10-8.

Тип двигателя	Номинальная мощность на валу, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{макс}}{M_н}$	$\frac{M_{пуск}}{M_н}$	$\frac{I_{пуск}}{I_н}$
		Частота вращения, об/мин	К. п. д., %	cos φ_1			
4А50В2У3	0,12	2880	63,0	0,70	2,2	2,0	5,0
4А80А2У3	1,5	2880	81,0	0,85	2,2	2,0	6,5
4А160М2У3	15	2910	88,0	0,91	2,1	1,4	7,5
4А80В4У3	1,5	1440	77,0	0,83	2,2	2,0	5,0
4А180М4У3	30	1455	90,5	0,90	2,2	1,4	7,0
4А112М6У3	3,0	960	81,0	0,76	2,2	2,0	6,0
4А180М8У3	15	720	87,0	0,82	2,0	1,2	6,0
4А280М10У3	45	582	91,5	0,78	1,8	1,0	6,0

10-3. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

10-10*. Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет коэффициент трансформации э. д. с. $k_e=2$; активное сопротивление фазы ротора $r_2=0{,}2$ Ом; реактивное сопротивление фазы неподвижного ротора $x_{2н}=2$ Ом при частоте $f=50$ Гц. Обмотка статора соединена в треугольник, ротора — в звезду. Двигатель питается от трехфазной сети напряжением 220 В. Считая э. д. с. фазы статора равной приложенному напряжению, определить ток двигателя при скольжении $s=8\%$, мощность двигателя на валу и к. п. д. двигателя при данной нагрузке, если потери

в меди поровну распределяются между статором и ротором, а потери в стали равны потерям на трение и в сумме составляют 288 Вт.

Анализ и решение

Коэффициент трансформации

$$k_E = \frac{U_{1ф}}{U_{2н.ф}} = \frac{E_{1ф}}{E_{2н.ф}} = 2.$$

Отсюда э. д. с. фазы неподвижного ротора

$$E_{2н.ф} = \frac{E_{1ф}}{2} = \frac{220}{2} = 110\,\text{В}.$$

Ток фазы ротора при заданном скольжении определится из формулы

$$I_2 = \frac{E_{2н.ф}}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_{2н}^2}} = \frac{110}{\sqrt{\left(\frac{0,2}{0,08}\right)^2 + 2^2}} = 34,3\,\text{А}.$$

С некоторым приближением для двигателя с фазным ротором коэффициент трансформации э. д. с. можно считать равным коэффициенту трансформации токов, т. е.

$$k_i = k_e = \frac{E_{1ф}}{E_{2н.ф}} = \frac{I_{2ф}}{I_{1ф}}.$$

Отсюда определим ток фазы статора $I_{1ф} = I_{2ф}/k = 34,3/2 = 17,15$ А. Линейный ток двигателя при соединении обмотки статора в треугольник $I_{1л} = I_{1ф}\sqrt{3} = 17,15 \cdot 1,73 = 29,6$ А.

Мощность, переданная ротору (электромагнитная мощность),

$$P_{вр} = \frac{3I_2^2 r_2}{s} = \frac{3\,(34,3)^2 \cdot 0,2}{0,08} = 8860\ \text{Вт}.$$

Мощность потерь в меди ротора $P_{м2} = 3\,I_2^2 r_2 = 3 \cdot 34,3^2 \cdot 0,2 = 706$ Вт. Механическая мощность ротора $P_{мех} = P_{вр} - P_{м2} = 8850 - 706 = 8144$ Вт.

Мощность двигателя на валу $P = P_{мех} - P_{тр}$, где $P_{тр}$ — мощность потерь на трение, равна мощности потерь стали $P_{ст}$ и определится согласно условию задачи $P_{тр} = P_{ст} = 288/2 = 144$ Вт; $P = 8144 - 144 = 8000$ Вт.

Мощность, подводимая к двигателю, $P_1 = P + P_{тр} + P_{м2} + P_{м1} + P_{ст} = 8000 + 144 + 706 + 706 + 144 = 9700$ Вт.

Здесь $P + P_{тр} = P_{мех}$; $P_{мех} + P_{м2} = P_{вр}$.

Коэффициент полезного действия $\eta = P/P_1 = 8000/9700 = 0,825$.

Вопросы и упражнения к задаче 10-10

1. По данным задачи 10-10 определить $\cos\varphi$ двигателя при заданной нагрузке, когда скольжение $s = 8\%$.

2. По данным задачи 10-8, пренебрегая потерями на нагрев обмоток и считая коэффициент трансформации токов неизменным, определить скольжение и $\cos\varphi$ двигателя при холостом ходе.

3. Механические характеристики двигателя с фазным ротором при сопротивлении реостата в цепи ротора $R_р=0$; $R_{р1}=0{,}0122$ Ом: $R_{р2}=0{,}072$ Ом и $R_{р3}=0{,}325$ Ом представлены на рис. 10-18. Номинальный вращающий момент $M_{вр.н}=507$ Н·м. Определить:

а) Возможен ли пуск двигателя при номинальной нагрузке и $R_р=0$ (ротор замкнут накоротко).

б) Возможен ли пуск двигателя без нагрузки на валу и $R_р=0$, если момент трения при пуске 50 Н·м.

в) Изменится ли ток ротора, соответствующий максимальному моменту при разных сопротивлениях реостата, введенного в цепь ротора [1].

Рис. 10-18. К задаче 10-10.

г) Изменится ли пусковой ток ротора $I_{2пуск}$ при увеличении сопротивления реостата в цепи ротора [1].

д) Изменится ли перегрузочная способность двигателя ($M_{вр.макс}/M_{вр.н}$), если в цепь ротора введено сопротивление реостата $R_р=0$; $R_{р1}$ и $R_{р2}$. Определить также в каждом из указанных случаев перегрузочную способность двигателя.

4. Пуск двигателя с фазным ротором, характеристики которого представлены на рис. 10-18, происходит при номинальной нагрузке и введенном сопротивлении реостата $R_{р3}$. По достижении установившейся частоты вращения реостат выводится до сопротивления $R_{р2}$. По достижении новой установившейся частоты вращения реостат снова выводится до сопротивления $R_{р1}$ и т. д. до полного выве-

---

[1] Использовать формулы (1) и (4), данные в решении задачи 10-7. При этом учесть, что скольжение, соответствующее максимальному моменту, определяется по приближенной формуле $s_{м.м}=\dfrac{r_2+R_р}{2x_{2н}}$, где $r_2+R_р$ — активное сопротивление фазы ротора и введенного в цепь ротора реостата; $x_{2н}$ — реактивное сопротивление фазы неподвижного ротора.

дения реостата ($R_р=0$). Определить установившиеся частоты вращения (об/мин) при $R_{р3}$, $R_{р2}$, $R_{р1}$ и $R_р=0$.

10-11. Трехфазный асинхронный двигатель серии АК имеет номинальную мощность 35 кВт при номинальной частоте вращения 730 об/мин. Номинальный к. п. д. двигателя 0,88 и $\cos\varphi_н=0{,}81$. Обмотки статора и ротора соединены в звезду. Напряжение сети 380 В, напряжение на кольцах неподвижного ротора $E_{2н.л}=125$ В (линейное). Номинальный ток ротора 188 А и активное сопротивление одной фазы его $r_2=0{,}01$ Ом.

Условие 1. Определить реактивное сопротивление фазы неподвижного ротора $x_{2н}$, скольжение $s_н$, ток ротора I_2 и электромагнитный вращающий момент двигателя $M_{вр}$ при номинальной нагрузке, нагрузке, соответствующей максимальному моменту, и при пуске в ход без реостата в цепи ротора.

Условие 2. Определить ток в цепи питания двигателя при номинальной нагрузке, пусковой ток и пусковой момент при пуске двигателя без реостата и с реостатом в цепи ротора. Сопротивление реостата принять равным 0,0122; 0,072; 0,325 Ом.

Указание. Для определения пусковых токов следует предварительно по данному току ротора и вычисленному току статора при номинальной нагрузке $\left(I_{1лY}=I_{1фY}=\dfrac{P_н}{\sqrt{3}\,U_{1л}\,\eta\cos\varphi_н}\right)$ определить коэффициент трансформации токов $k_i=I_{2ф}/I_{1ф}$ и, пользуясь им, рассчитать пусковые токи в сети $I_{1пуск}=I_{2пуск}/k_i$.

10-12. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет коэффициент трансформации э. д. с. и токов $k=2$; активное сопротивление фазы ротора $r_2=0{,}2$ Ом; реактивное сопротивление фазы неподвижного ротора $x_{2н}=1$ Ом при частоте $f=50$ Гц. Статор имеет соединение в треугольник и присоединен к сети с напряжением 220 В; обмотка ротора имеет соединение в звезду. Электродвижущую силу фазы статора считать равной приложенному напряжению.

Условие 1. Определить ток двигателя при скольжении $s=8\%$, соответствующем номинальной нагрузке; скольжение и ток двигателя, соответствующие максимальному моменту, и перегрузочную способность двигателя.

Условие 2. Определить пусковой ток и пусковой вращающий момент при пуске двигателя в качестве короткозамкнутого. Определить также сопротивление пускового реостата в цепи ротора и получившиеся при этом пусковой момент и пусковой ток, если при включении реостата пусковой ток должен быть уменьшен в 2 раза. Число полюсов двигателя $2p=4; 6; 8$.

Условие 3. Определить сопротивление реостата в цепи ротора, при котором частота вращения двигателя, работающего с номинальной нагрузкой, уменьшится в 2 раза. Число полюсов двигателя $2p=4$.

10-4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

10-13*. Трехфазный синхронный генератор, обмотки которого соединены в звезду, дает при холостом ходе линейное напряжение 400 В. При работе с нагрузкой 50 А и $\cos\varphi=0{,}8$ напряжение снижается до 380 В. Пренебрегая активным падением напряжения в об-

мотках статора и считая, что реактивное сопротивление рассеяния $x_s = 0{,}2$ Ом, определить э. д. с. генератора при холостом ходе, при работе под нагрузкой и процентное изменение напряжения при переходе от холостого хода к нагрузке. Построить векторную диаграмму.

Анализ и решение

Синхронная машина имеет такой же статор с обмоткой, как асинхронная машина. Ротор же представляет систему электромагнитов, обмотка которых (обмотка возбуждения) через кольца и щетки получает питание от источника постоянного тока (рис. 5-8).

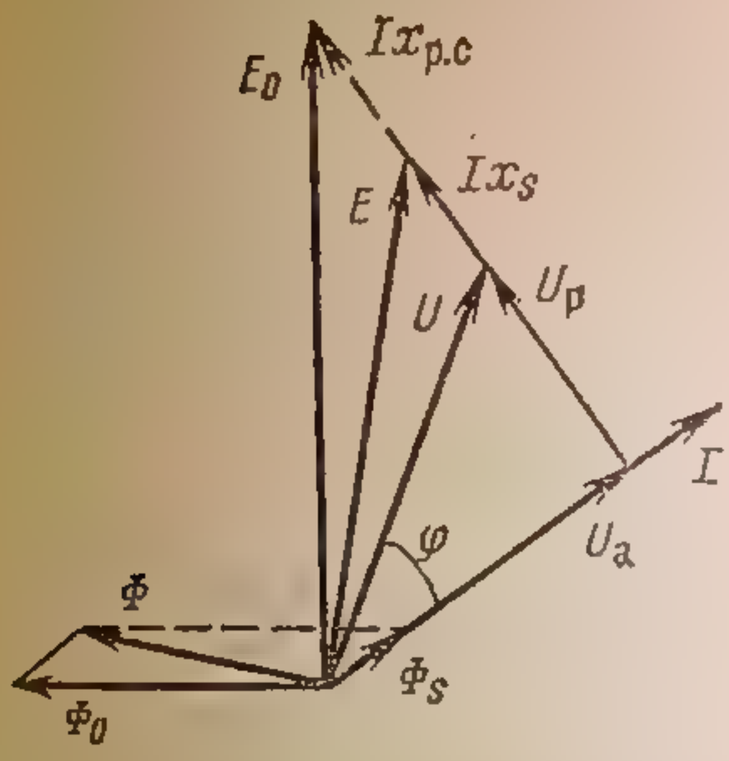


Рис. 10-19. К задаче 10-13.

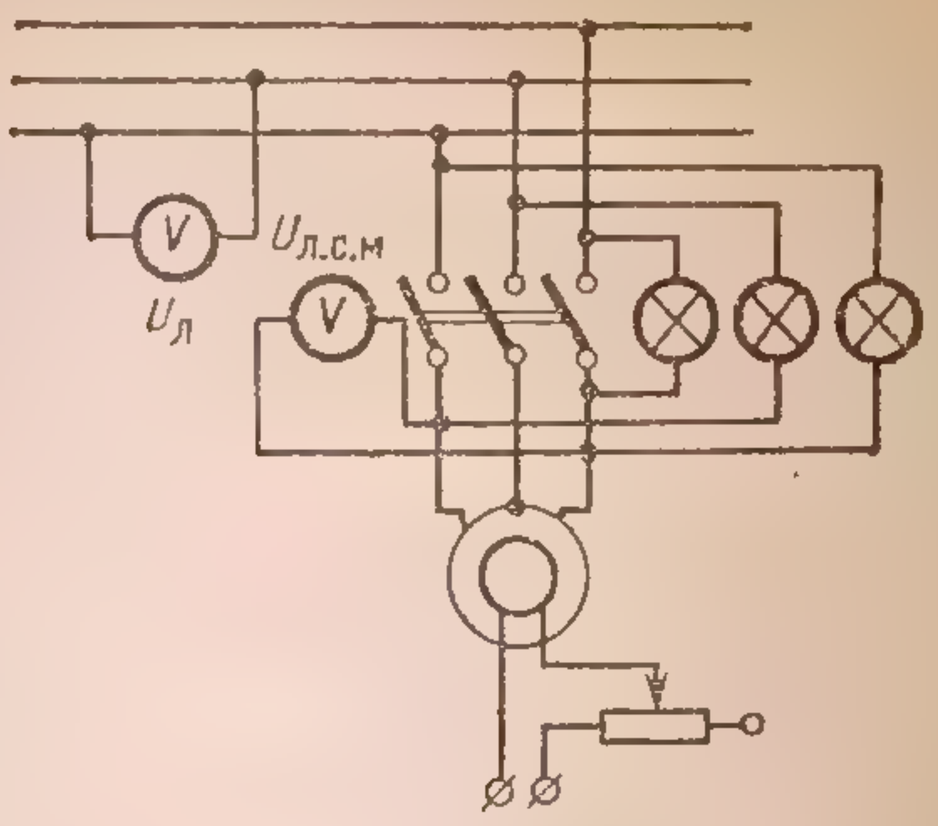


Рис. 10-20. К задаче 10-14.

При вращении ротора посторонним двигателем в каждой фазе обмотки статора индуктируется э. д. с., частота которой связана с числом пар полюсов p и частотой вращения n формулой $f = pn/60$.

В нагруженном трехфазном генераторе токи, протекающие по обмоткам статора, образуют вращающееся магнитное поле, частота вращения которого $n_1 = 60f/p$ равна частоте вращения ротора n; отсюда и название машины — *синхронная*. У синхронных машин вследствие больших воздушных зазоров по сравнению с асинхронными реактивное сопротивление обмотки статора, обусловленное потоком рассеяния, значительно. Это позволяет при расчетах пренебречь активным сопротивлением. С учетом этого векторная диаграмма (одной фазы) синхронного генератора будет иметь вид, как показано на рис. 10-19.

Фазная э. д. с. при холостом ходе $E_0 = 400/\sqrt{3} = 232$ В отстает по фазе от основного потока Φ_0 на 90°. Ток I и поток рассеяния Φ_s совпадают по фазе. Результирующий поток Φ получается несколько ослабленным, поэтому э. д. с. E при нагрузке меньше, чем E_0. Напряжение $U = 380/\sqrt{3} = 220$ В опережает по фазе ток I на угол φ (активно-индуктивная нагрузка).

Активная слагающая напряжения $U_2 = U\cos\varphi = 220 \cdot 0{,}8 = 176$ В, реактивная составляющая $U_р = U\sin\varphi = 220 \cdot 0{,}6 = 132$ В. Реактивное падение напряжения в обмотке статора $x_s = 50 \cdot 0{,}2 = 10$ В.

Следовательно (рис. 10-19), э. д. с. генератора при нагрузке

$$E = \sqrt{176^2 + (132 + 10)^2} = 220 \text{ В}.$$

Процентное изменение напряжения при переходе от холостого хода к нагрузке

$$\Delta U_{\%} = \frac{E_0 - U}{U} \cdot 100 = \frac{232 - 220}{220} \cdot 100 = 5{,}5\ \%,$$

10-14*. Трехфазный синхронный генератор, обмотка статора которого соединена в звезду, включается на работу параллельно с сетью, питаемой генераторами весьма большой мощности, сопротивлением которых можно пренебречь. При включении машины соблюдаются следующие условия: фазная э. д. с. включаемой машины равна фазному напряжению $E = U = 220$ В и находится с ним в противофазе; частота э. д. с. равна частоте сети [1] (рис. 10-20). Реактивное сопротивление включаемой машины $x = 0{,}5$ Ом, активным сопротивлением обмотки статора можно пренебречь.

Условие 1. Построить векторные диаграммы и определить фазный ток, активную и реактивную мощности машины в трех случаях:

а) э. д. с. равна фазному напряжению сети $E = U = 220$ В;

б) после включения на параллельную работу э. д. с. машины посредством реостата в цепи возбуждения увеличили до 230 В;

в) после включения на параллельную работу э. д. с. машины посредством реостата в цепи возбуждения уменьшили до 210 В.

Анализ и решение

По второму закону Кирхгофа в векторной форме можно написать $\bar{E} + \bar{U} = \bar{I}z = \bar{I}x$, так как активным сопротивлением обмотки статора следует пренебречь. С другой стороны, напряжение синхронной машины $U_{см}$, включенной в сеть, равно и противоположно по фазе напряжению сети U, т. е. $\bar{U} = -\bar{U}_{с.м}$. Поэтому $\bar{E} - \bar{U}_{с.м} = \bar{I}x = \Delta\bar{U}$ и ток в цепи подключенного генератора $I = \Delta U/x$.

Векторная диаграмма для случая «а» изображена на рис. 10-21, *а*: $\Delta\bar{U} = \bar{E} - \bar{U}_{с.м} = 0$, следовательно, ток $I = 0$ и машина работает вхолостую: $P = 0$, $Q = 0$.

Для случая «б» векторная диаграмма изображена на рис. 10-21, *б*. Здесь $\Delta U = E - U_{см} = 10$ В, а ток

$$I = \frac{\Delta U}{x} = \frac{10}{0{,}5} = 20 \text{ А}.$$

Вектор тока должен отставать по фазе от вектора $\Delta\bar{U}$ на 90°, как в цепи с одним реактивным сопротивлением. По отношению же к на-

---

[1] Изменение э. д. с. машины и достижение равенства $E = U$ осуществляются с помощью реостата в цепи возбуждения и определяются по показаниям вольтметров (рис. 10-20) $U_{л} = U_{л.см}$. Равенство частот достигается посредством регулирования частоты вращения первичного двигателя и приближенно определяется по частотомерам. При неравенстве частот лампы, включенные к противолежащим выводам выключенного рубильника, будут периодически зажигаться и гаснуть. При равенстве частот и нахождении э. д. с. и напряжения в противофазе в замкнутой цепи «сеть — генератор» лампы должны погаснуть, и в это время при одинаковых показаниях вольтметров машина включается на параллельную работу с сетью.

пряжению сети вектор тока является опережающим на 90°. Следовательно, машина работает как конденсатор и может служить для компенсации реактивной мощности в общей сети (синхронный компенсатор). Активная мощность $P=3\,3UI\cos\varphi=0$, реактивная мощность $Q=3UI\sin\varphi=3\cdot220\cdot20\cdot1\cdot10^{-3}=13{,}2$ квар.

Для случая «в» векторная диаграмма изображена на рис. 10-21, *в*. Здесь $\Delta U=U_{см}-E=10$ В, $I=10/0{,}5=20$ А. Но в отличие от случая «б» вектор тока, отставая по фазе от вектора $\overline{\Delta U}$ на 90°, отстает по фазе на такой же угол от напряжения сети U. Следовательно, машина является индуктивной нагрузкой для сети $P=0$, $Q=13{,}2$ квар.

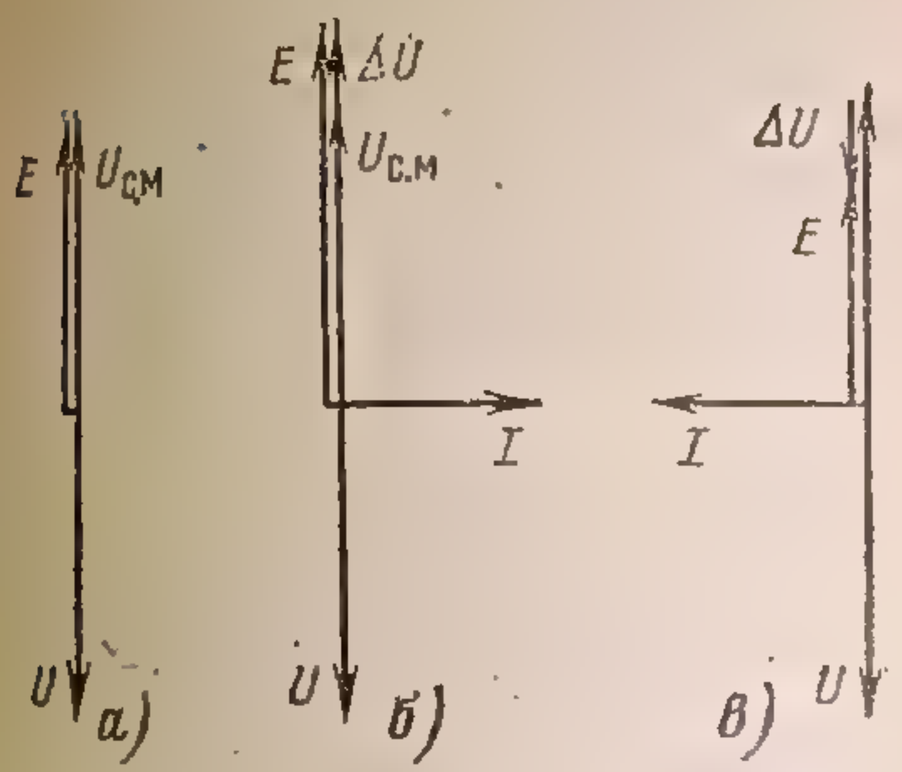


Рис. 10-21. К задаче 10-14.

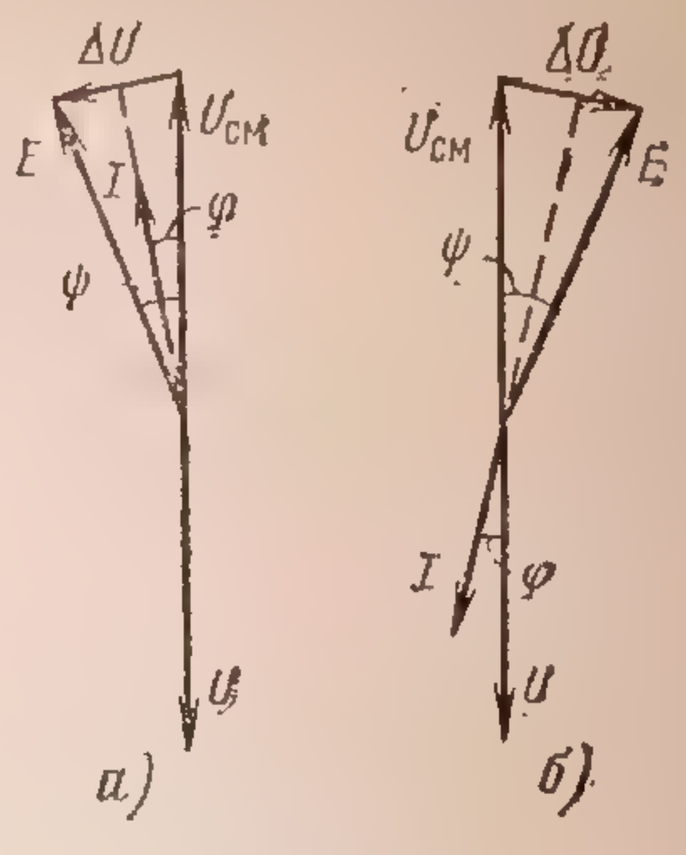


Рис. 10-22. К задаче 10-14.

Условие 2. После включения машины в сеть к ротору ее приложен добавочный вращающий момент, вызывающий вследствие временного ускорения поворот вектора э. д. с. (по ходу вращения векторов) на угол $\psi=10°$.

Построить векторную диаграмму при неизменной э. д. с., определить ток, активную и реактивную мощность.

Анализ и решение

Векторная диаграмма показана на рис. 10-22, *а*. Вектор $\overline{\Delta U}=\overline{E}-\overline{U}_{см}$ соединяет концы векторов $\overline{E}$ и $\overline{U}_{см}$ и направлен к уменьшаемому. Ток I остает по фазе от вектора $\overline{\Delta U}$ на 90° и имеет активную слагающую, совпадающую с э. д. с. E. Это значит, что машина работает в режиме генератора и отдает в сеть активную мощность $P=U_{см}I\cos\varphi$. При генераторном режиме возникнет тормозной момент, который уравновесит возросший вращающий момент. Поэтому ротор, сдвинувшись вперед по ходу вращения, будет дальше вращаться с прежней синхронной частотой вращения.

Из векторной диаграммы следует: $\varphi=\psi/2=5°$; $\Delta U/2=U_{с.м}\sin\varphi$, откуда $\Delta U=2U_{с.м}\sin\varphi=2\cdot220\cdot0{,}0872=38{,}3$ В. Ток

$$I=\frac{\Delta U}{x}=\frac{38{,}3}{0{,}5}=76{,}6\text{ А};\quad P=3\cdot220\cdot76{,}6\cdot0{,}99\cdot10^{-3}=50\text{ кВт}.$$

Реактивная мощность $Q=3\cdot220\cdot76{,}6\cdot0{,}0872\cdot10^{-3}=4{,}4$ квар.

Условие 3. После синхронизации и включения машины в сеть первичный разгонный двигатель отсоединяется и на валу ротора создается тормозной момент (механическая нагрузка), вызывающий смещение вектора э. д. с. в сторону отставания от вектора напряжения сети на угол $\psi=10°$. Построить векторную диаграмму при неизменной э. д. с. Определить ток, активную мощность и момент на валу, если к. п. д. машины $\eta=0{,}85$ и частота вращения ротора $n=1500$ об/мин.

Анализ и решение

В двигательном режиме векторная диаграмма для этого условия показана на рис. 10-22, *б*. Вектор $\overline{\Delta U}$, как и в предыдущем случае, соединяет концы векторов $\overline{E}$ и $\overline{U}_{см}$ и направлен к уменьшаемому. Ток I отстает по фазе от ΔU на 90° и имеет активную слагающую, совпадающую по фазе с напряжением сети U, и направлен против вектора э. д. с. E. Из этого следует, что машина работает в режиме двигателя и потребляет из сети активную мощность $P=UI\cos\varphi$. Двигатель развивает вращающий момент, который уравновешивает тормозной момент, и ротор, получив временное замедление, будет продолжать вращаться с прежней синхронной частотой вращения. Расчет требуемых величин остается таким же, как и в предыдущем случае, т. е. $\varphi=\psi/2=5°$; $\Delta U=38{,}3$ В; $I=76{,}6$ А. Мощность, подводимая к двигателю, $P_1=3UI\cos\varphi=50$ кВт. Мощность двигателя на валу $P=P_1\eta=50\cdot0{,}85=42{,}5$ кВт. Момент на валу определится из выражения

$$M=9{,}55\frac{P}{n}=9{,}55\frac{42\,500}{1500}=270\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 10-13, 10-14

1. Руководствуясь векторной диаграммой синхронного генератора (рис. 10-19), при неизменных токе и э. д. с. холостого хода определить, как изменятся э. д. с. и напряжение нагруженного генератора, если: а) угол φ уменьшится; б) угол φ увеличится?

2. Перед включением синхронной машины на параллельную работу с сетью оказалось, что показания вольтметра одинаковы: $U_л=U_{л.см}=127$ В, но частота сети не равна частоте включаемого генератора. В каких пределах будет изменяться напряжение на лампах (рис. 10-20)? Обмотка статора соединена в звезду.

3. Что нужно сделать для синхронизации генератора с сетью (рис. 10-20), если показания вольтметров одинаковы, а частота включаемого генератора: а) меньше частоты сети; б) больше частоты сети.

4. Какая из векторных диаграмм, изображенных на рис. 10-21 и 10-22, соответствует: 1) генераторному режиму; 2) режиму работы в качестве двигателя; 3) холостому ходу?

5. Синхронная машина имеет возбуждение, при котором $E=U$ (рис. 10-22). Угол сдвига фаз между током и напряжением сети U: а) 20°; б) 40°; в) 140°; г) 160°. В каком из указанных случаев машина работает в режиме генератора, в режиме двигателя?

10-15. По данным задачи 10-13, пользуясь векторной диаграммой рис. 10-19, определить синхронно-реактивное сопротивление, а

также активную и реактивную мощности трехфазного синхронного генератора.

Указание. Снижение э. д. с. генератора при нагрузке происходит за счет реакции статора. Падение напряжения от реакции статора может быть выражено через добавочное реактивное сопротивление $x_{р.с}$ (рис. 10-19). Тогда э. д. с. холостого хода

$$E_0 = \sqrt{U_а^2 + (U_р + 2x_s + I_{р.с})^2}.$$

Определив отсюда $x_{р.с}$ и сложив его с x_s, получим полное синхронное реактивное сопротивление генератора x.

10-16. Синхронная машина работает вхолостую. Векторная диаграмма приведена на рис. 10-21. Напряжение $U=220$ В, частота 50 Гц. Реактивное сопротивление обмотки статора $x=0{,}8$ Ом, активным сопротивлением пренебречь.

Условие 1. Машина работает с перевозбуждением в режиме синхронного компенсатора, $E=240$ В. Определить емкость конденсатора, эквивалентного по своему действию данному компенсатору.

Условие 2. Машина работает с недовозбуждением, $E=200$ В. Определить эквивалентную индуктивность, заменяющую машину в данном режиме работы.

10-17. Трехфазная машина, обмотка которой соединена в звезду, имеет э. д. с. $E=130$ В, равную фазному напряжению U (рис. 10-22). Угол $\psi=20°$, реактивное сопротивление обмотки статора $x=0{,}8$ Ом, активным сопротивлением пренебречь.

Условие 1. Машина работает в генераторном режиме. Определить ток и мощность, отдаваемую машиной в сеть.

Условие 2. Машина работает в режиме двигателя. Определить ток, мощность и вращающий момент двигателя на валу, если к. п. д. двигателя $\eta=0{,}84$. Задачу решить для двигателя, имеющего частоту вращения 3000 и 1500 об/мин.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

11-1. ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

11-1*. Определить мощность электродвигателя для привода ленточного транспортера, имеющего окружное усилие на барабане $F_б=600$ кгс и скорость $v_б=0{,}5$ м/с. Диаметр барабана $D=600$ мм, к. п. д. передачи $\eta_{пер}=0{,}76$. Определить также частоту вращения электродвигателя, если соединение двигателя с барабаном осуществляется через редуктор с передаточным числом $\mu=90$.

Анализ и решение

Мощность транспортера $P_{тр}=F_б v_б=600\cdot 0{,}5=300$ кгс·м/с $=2950$ Вт $=2{,}95$ кВт. С учетом потерь в передаче мощность двигателя выразится: $P_{дв}=\dfrac{P_{тр}}{\eta_{пер}}=\dfrac{2{,}95}{0{,}76}=3{,}9$ кВт. Частота вращения барабана, выраженная числом оборотов в минуту, определится из урав-

ения $v_б = \frac{\pi D n_б}{60}$. Отсюда $n_б = \frac{60 v_б}{\pi D} = \frac{60 \cdot 0{,}5}{\pi \cdot 0{,}6} = 16$ об/мин. Передаточное число $\mu = n_{дв}/n_б$, отсюда $n_{дв} = n_б \mu = 16 \cdot 90 = 1440$ об/мин.

Окончательный выбор двигателя по рассчитанной мощности, скорости и с учетом рода тока (постоянного или переменного) производится по каталогу.

11-2*. По условию предыдущей задачи выбран по каталогу для длительной работы трехфазный асинхронный двигатель мощностью 4 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Коэффициент полезного действия двигателя 86%. Этот же двигатель желают использовать для кратковременной работы с мощностью 6 кВт. Коэффициент полезного действия при этом снижается до 80%.

Определить допустимую продолжительность работы, если допускаемое превышение температуры над температурой окружающей среды для обмоток двигателя составляет 65°С, а теплоемкость $C = 6{,}18 \cdot 10^4$ Дж/°С.

Анализ и решение

При решении задачи 2-16 использовалось уравнение теплового баланса при установившейся температуре провода, нагреваемого проходящим по нему током: $I^2 r = k S_1 \Theta_{уст}$. Применительно к нагреву электрических машин преобразуем это уравнение к следующему виду: $P_0 = A \Theta_{уст}$, где P_0 — мощность потерь энергии в машине, преобразующаяся в тепло; A — коэффициент теплоотдачи; $\Theta_{уст}$ — установившееся превышение температуры машины над окружающей средой.

Мощность, потребляемая двигателем из сети при номинальной нагрузке, выразится: $P_{1н} = P_н/\eta_н = 4/0{,}86 = 4{,}67$ кВт; мощность потерь $P_{0н} = P_{1н} - P_н = 4{,}67 - 4 = 0{,}67$ кВт; коэффициент теплоотдачи

$$A = \frac{P_{0н}}{\Theta_{уст.доп}} = \frac{670}{65} = 10{,}3 \text{ Вт/°С}.$$

При перегрузке мощность двигателя, потребляемая из сети, $P_1 = P/\eta = 6/0{,}8 = 7{,}5$ кВт; мощность потерь $P_0 = P_1 - P = 7{,}5 - 6 = 1{,}5$ кВт и установившаяся температура $\Theta_{уст} = P_0/A = 1500/10{,}3 = 146$°С

Превышение температуры двигателя Θ в функции времени t выражается уравнением:

$$\Theta = \Theta_{уст}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \qquad (1)$$

где e — основание натуральных логарифмов (2,718); T — так называемая постоянная времени нагрева, $T = C/A$, с.

Из уравнения (1) видно, что при $t = 0$ $\Theta = 0$, а с течением времени Θ растет, достигая $\Theta_{уст}$ при $t = \infty$. Практически можно считать, что превышение температуры достигнет установившегося значения через время $t = 4T$ (превышение температуры будет отличаться от установившегося меньше чем на 2%). Определив постоянную времени и подставив в уравнение (1) известные значения, получим:

$$T = \frac{C}{A} = \frac{6{,}18 \cdot 10^4}{10{,}3 \cdot 60} = 100 \text{ мин}; \quad 65 = 146\left(1 - e^{-\frac{t}{100}}\right).$$

Допустимое время t работы двигателя определим, решая полученное уравнение: $\frac{65}{146} - 1 = -e^{-\frac{t}{100}}$; $0{,}554 = e^{-\frac{t}{100}}$. Логарифмируя и опуская промежуточные вычисления, окончательно получим $t \approx 60$ мин. Мощность, которую машина может развивать в течение часа, не перегреваясь, называется также часовой мощностью.

Вопросы и упражнения к задачам 11-1 и 11-2

1. Грузоподъемность электрического крана 1,5 т. Подъем груза осуществляется со скоростью 0,4 м/с, к. п. д. передачи 0,75. Определить потребную мощность электродвигателя.

2. Какой из перечисленных двигателей следует выбрать для привода различных механизмов: а) постоянного тока с параллельным возбуждением; б) трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором; в) синхронный — с тем, чтобы удовлетворялось следующее требование: постоянная скорость, не зависящая от нагрузки; возможность широкого и плавного регулирования скорости; пуск непосредственным включением в сеть (без реостата) и жесткая механическая характеристика.

11-3. Рассчитать мощность и частоту вращения электродвигателя (об/мин) для привода конвейера через редуктор и цепную передачу с общим передаточным числом $\mu = 20$. Усилие, передаваемое лентой конвейера, 510 кгс, скорость ленты 1 м/с, диаметр ведущего барабана 300 мм, общий к. п. д. привода 0,85.

11-4. Двигатель с номинальной мощностью 6 кВт используется для кратковременной работы при мощности 8 кВт. Превышение температуры двигателя не должно быть больше 65°С. Коэффициент полезного действия двигателя при номинальной нагрузке и перегрузке принять равным 0,87, постоянную времени $T = 50$ мин. Определить допустимую продолжительность работы электродвигателя.

11-2. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

В нижеследующих задачах рассматриваются схемы электродвигателей постоянного и переменного тока с релейно-контакторным управлением. В качестве аппаратуры для дистанционного и автоматического управления используются контакторы и различные реле. Согласно ГОСТ для катушек контакторов, реле и их контактов, а также для кнопок управления приняты обозначения на схемах по рис. 11-1.

Обычно главные цепи двигателей (силовые цепи) изображаются отдельно от цепей управления. Это делается для наглядности и простоты чтения схем, а также потому, что цепи управления зачастую питаются от отдельного источника. При этом нужно иметь в виду, что для удобства чтения схем отдельные элементы одного и того же аппарата изображаются по принадлежности на разных схемах. Так, контактор магнитного пускателя для трехфазного асинхронного двигателя состоит из обмотки, ферромагнитного сердечника и четырех контактов, которые замыкаются при втягивании сердечника в обмотку. Обмотка контактора K и один контакт (так называемый вспомогательный контакт или блок-контакт) относятся к цепи управления, а три контакта — к силовой цепи (рис. 11-2). Поэтому обмотка контактора и вспомогательный контакт изображаются на схеме управ-

ления (рис. 11-3, *а*), а три других контакта — на схеме силовой цепи (рис. 11-3, *б*).

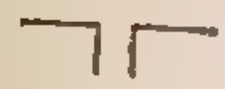
11-5*. На рис. 11-4 дана схема силовой цепи трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором. Двигатель пускается в ход посредством линейного контактора с тремя рабочими контактами в силовой цепи *К* и одним вспомогательным контактом *К*, включенных в цепь управления, шунтирующим кнопку *Пуск*. Для автоматического выведения реостата в цепи ротора (в две ступени) применяются два реле времени PB_1 и PB_2 с контактами с выдержкой времени при замыкании и два реле ускорения (типа контакторов) $У_1$ и $У_2$ с одноименными контактами в силовой цепи и в цепи управления.

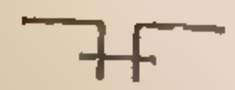
— кнопка с самовозвратом с замыкающим контактом

— кнопка с самовозвратом с размыкающим контактом

— катушка контактора

— обмотка реле, контактора и магнитного пускателя


— контакт контактора или реле замыкающий, т. е. разомкнутый при отсутствии тока в катушке электромагнита


— контакт размыкающий, т. е. замкнутый при отсутствии тока (или при недостаточном токе) в катушке электромагнита

— обмотка напряжения реле

— обмотка реле токовая

— нагревательный элемент теплового реле

— контакт замыкающий с выдержкой времени при замыкании

Рис. 11-1.

Построить и описать схему управления данного двигателя. Применить в цепи управления реле напряжения *РН*, не допускающее включения двигателя при пониженном напряжении.

Анализ и решение

Требуемая схема цепи управления двигателя представлена на рис. 11-5. При нажатии кнопки *Пуск* и при номинальном напряжении на выводах цепи реле напряжения *РН* сработает и замкнется одноименный контакт реле. Обмотка линейного контактора *К* получит питание, и он сработает. При этом замкнутся одноименные контакты контактора в силовой цепи и в цепи управления. Двигатель включится в сеть при полностью введенных сопротивлениях цепи ротора. Вспомогательный контакт зашунтирует кнопку *Пуск*. Таким образом, при отпускании кнопки обмотка реле напряжения и обмотка линейного контактора останутся включенными. Одновременно с включением двигателя при замыкании контактов *РН* включится обмотка реле

времени PB_1, и по истечении установленной выдержки времени замкнутся контакты реле PB_1, через которые получит питание обмотка контактора ускорения $У_1$, который сработает; его контакты $У_1$ замкнутся, и в цепи ротора окажется выведенной одна секция сопротивлений. Двигатель получит ускорение. Одновременно с этим включится катушка второго реле времени PB_2, и по истечении установленной

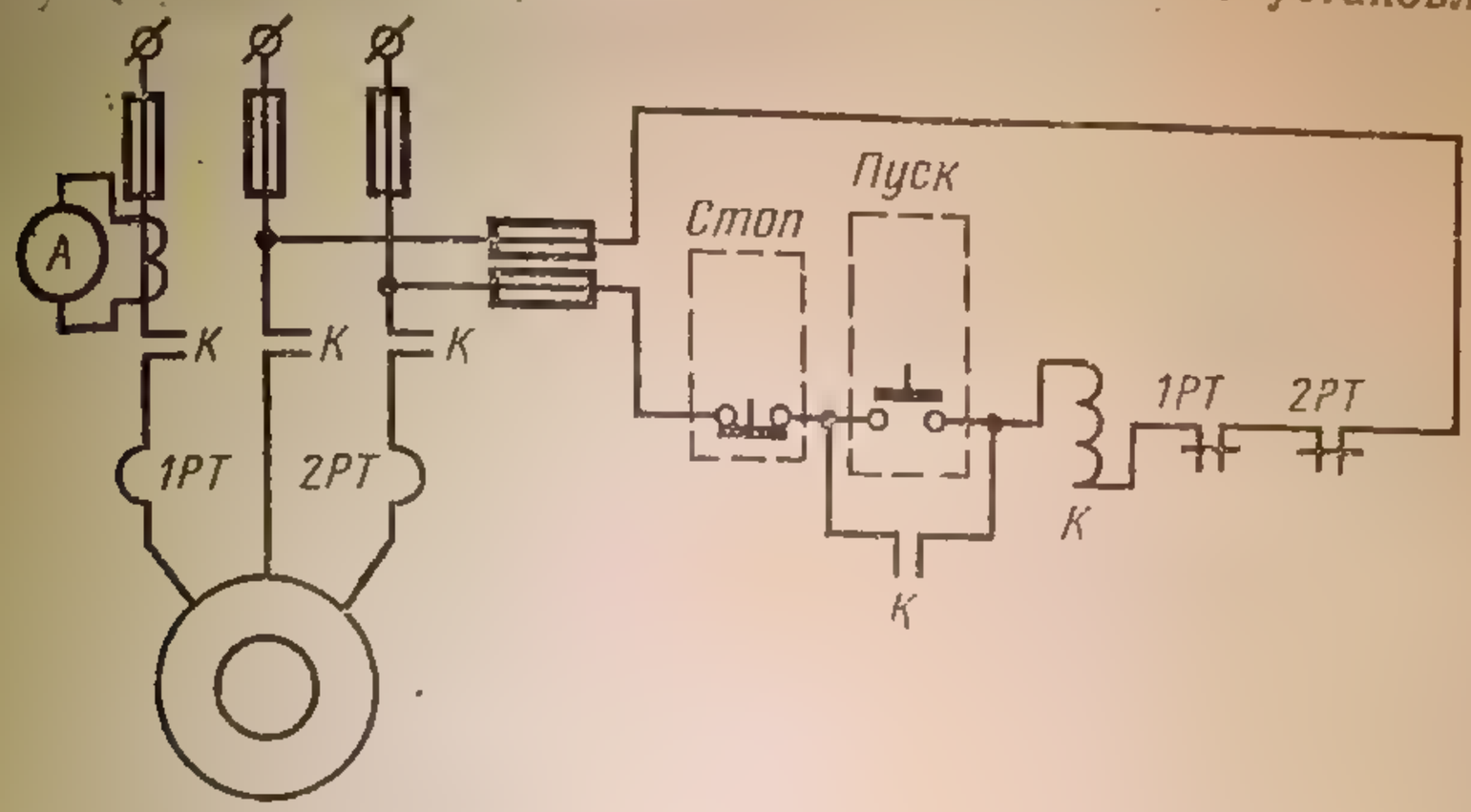


Рис. 11-2.

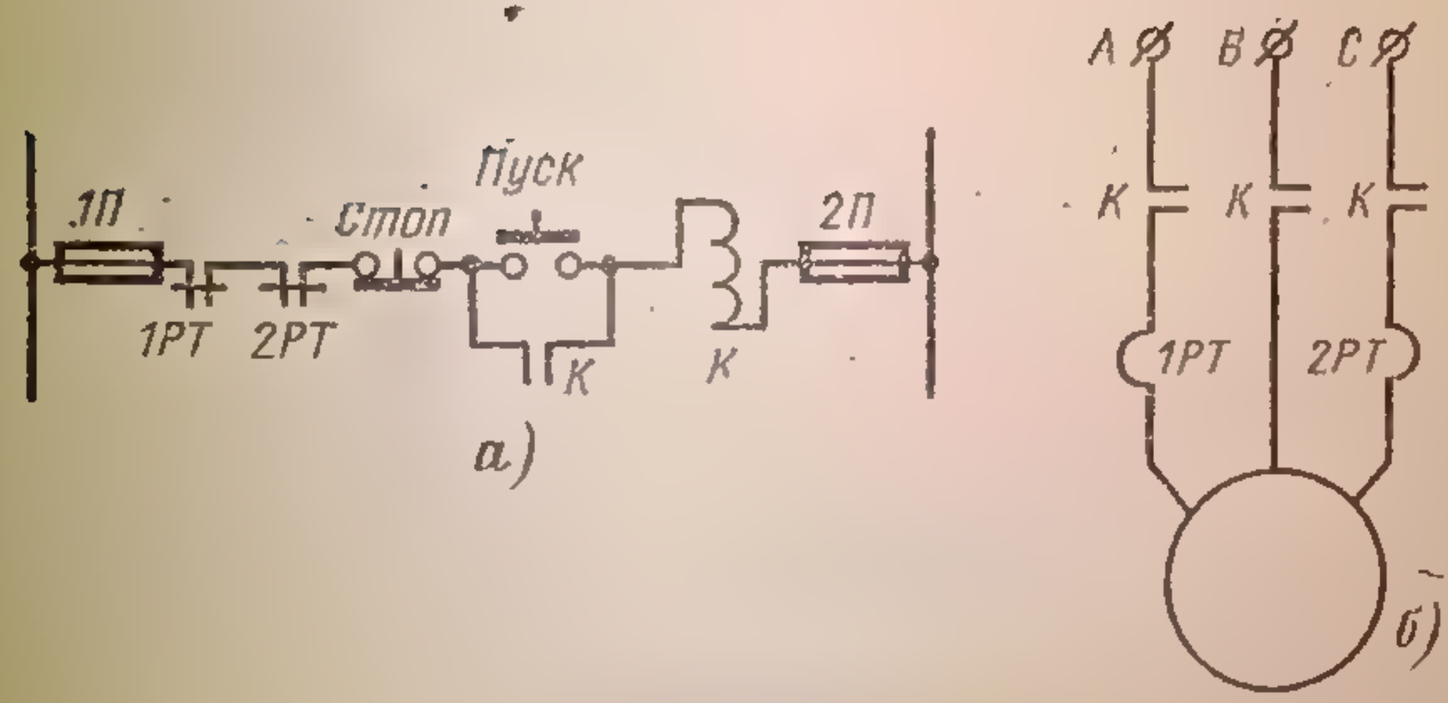


Рис. 11-3. К задачам 11-5, 11-6.

выдержки замкнется контакт реле PB_2 и включится обмотка контактора ускорения $У_2$. Тогда замкнутся одноименные контакты реле в цепи ротора и реостат будет полностью выведен. Двигатель получит новое ускорение, и частота его вращения установится в соответствии с нагрузкой. При нажатии кнопки *Стоп* прекратится питание обмоток *РН* и линейного контактора *К*, разомкнутся контакты *К* в силовой цепи и двигатель будет отключен от сети. При пониженном напряжении на выводах цепи и нажатии кнопки *Пуск* реле напряжения *РН* не сработает, одноименный контакт реле в цепи управления не замкнется и двигатель не включится.

11-6*. На рис. 11-6 дана схема силовой цепи двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Двигатель пускается в ход посредством линейного контактора *К* с одним контактом в силовой цепи и двумя контактами в цепи управления. Один из них (вспомогательный контакт) шунтирует кнопку *Пуск*. Для автоматического вы-

ведения реостата в цепи якоря в силовой цепи применяются два токовых реле *1РМ*, *2РМ*, имеющих в цепи управления размыкающие одноименные контакты, которые размыкаются при уменьшении тока реле ниже определенного значения (так называемого тока трогания реле). В процессе пуска двигателя реостат должен быть выведен в две ступени. Для этого в цепи управления должны быть предусмотрены два дополнительных контактора ускорения $У_1$ и $У_2$ с одноименными контактами в обеих цепях.

Построить и описать схему цепи управления данного двигателя.

Анализ и решение

Схема цепи управления двигателя представлена на рис. 11-7.

При нажатии кнопки *Пуск* включится обмотка линейного контактора *К* и замкнутся вспомогательный контакт и одноименные контакты в цепи управления и силовой цепи. Двигатель включится в сеть

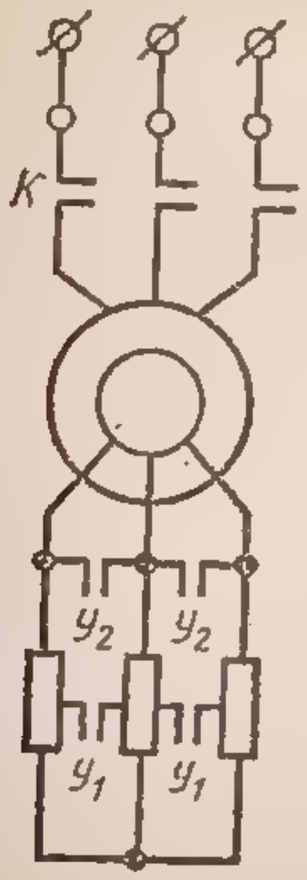


Рис. 11-4. К задаче 11-5.

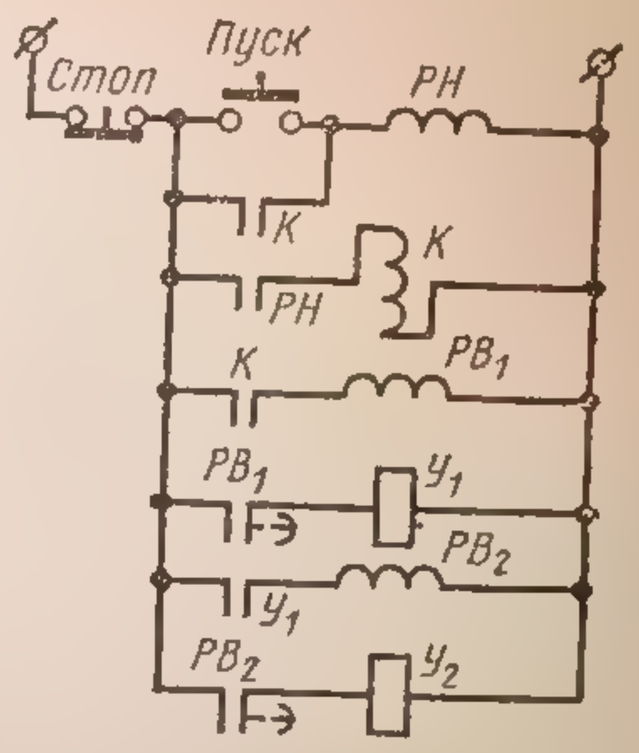


Рис. 11-5. К задаче 11-5.

при полностью введенном реостате. Пусковой ток двигателя вызовет срабатывание токового реле *1РМ*, и контакты реле *1РМ* в цепи управления разомкнутся; обмотки контакторов $У_1$ и $У_2$ не включатся. По мере нарастания частоты вращения двигателя ток в цепи якоря будет уменьшаться. Когда ток уменьшится до тока срабатывания реле *1РМ*, якорь этого реле отпадет и контакт реле *1РМ* в цепи управления замкнется. Тогда включится обмотка контактора $У_1$ и замкнутся одноименные контакты в силовой цепи и в цепи управления. Одна ступень реостата в цепи якоря двигателя окажется выведенной, что вызовет резкое увеличение тока якоря. Теперь ток якоря двигателя будет проходить через замкнутый контур $У_1$ и обмотку токового реле *2РМ*. Реле *2РМ* сработает, одноименный контакт его в цепи управления разомкнется, и обмотка контактора $У_2$ не включится. Опять по мере нарастания частоты вращения ток якоря двигателя будет уменьшаться, пока не станет меньше тока срабатывания реле, после чего якорь реле отпадает и контакты его *2РМ* в цепи управления замкнутся. Тогда включится обмотка контактора $У_2$,

замкнется контакт $У_2$ в силовой цепи и реостат в цепи якоря окажется выведенным (зашунтированным). При нажатии кнопки *Стоп* обмотка линейного контактора отключится, контакты контактора разомкнутся и двигатель отключится от сети.

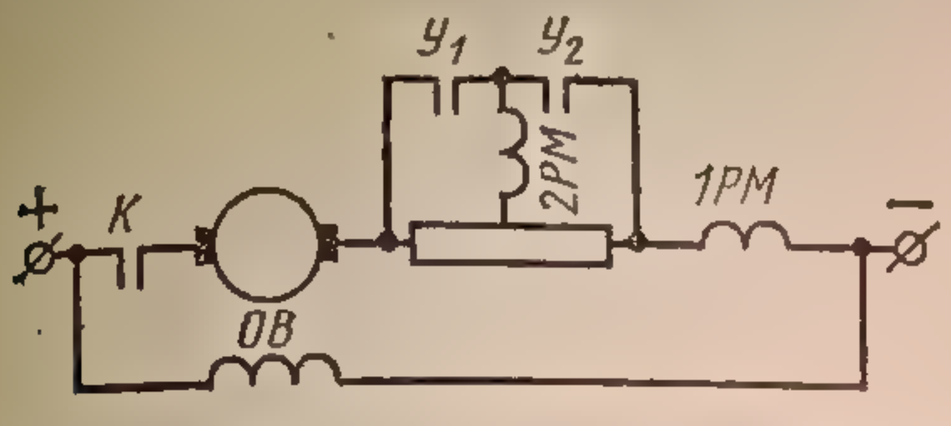


Рис. 11-6. К задаче 11-6.

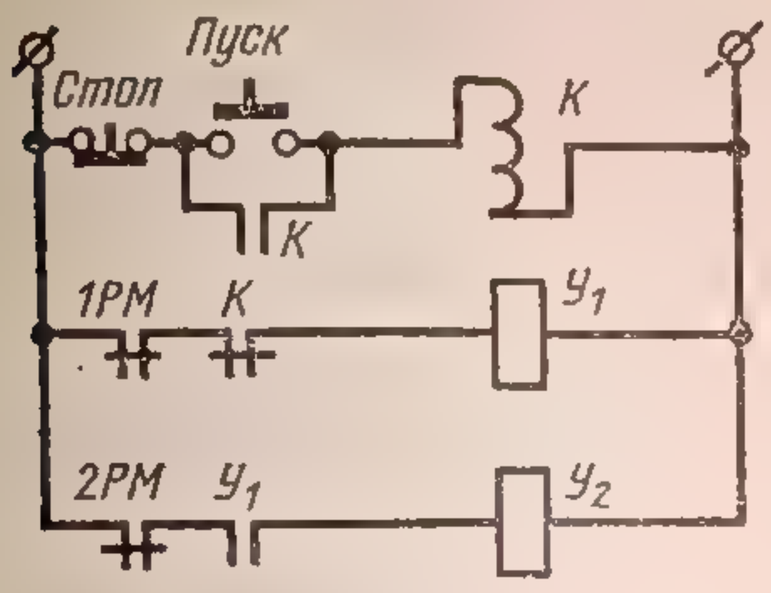


Рис. 11-7. К задаче 11-6.

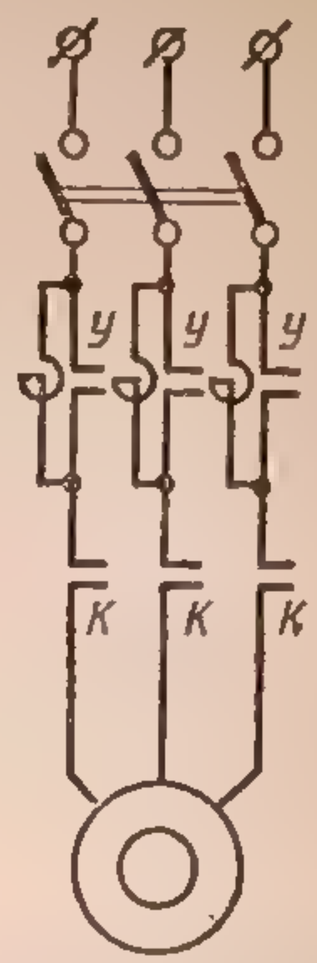


Рис. 11-8. К задачам 11-5, 11-6.

Вопросы и упражнения к задачам 11-5, 11-6

1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором включается и выключается посредством магнитного пускателя с тепловой защитой. Схема силовой цепи двигателя с линейными контактами и тепловыми реле представлена на рис. 11-3, *б*. Построить и описать схему цепи управления двигателя.

2. Для различных двигателей предусмотрены следующие условия работы.

а) Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором должен осуществляться через реакторы, ограничивающие пусковой ток двигателя, а затем по истечении некоторого заранее установленного времени, соответствующего выдержке времени реле, должно быть автоматически осуществлено непосредственное присоединение двигателя к сети.

Включение и отключение двигателя производятся посредством линейного контактора. Схема силовой цепи представлена на рис. 11-8.

б) Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением должен иметь контакторное включение и отключение, а также автоматическое выведение пускового реостата в две ступени с выдержкой времени. Схема силовой цепи двигателя представлена на рис. 11-9.

в) Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением должен иметь контакторный пуск, реверсирование и автоматическое (в две ступени) выведение пускового реостата с выдержкой времени. Реверсирование двигателя должно осуществляться путем пере-

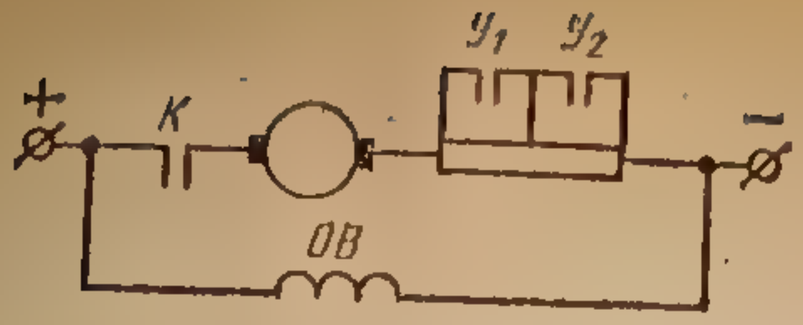


Рис. 11-9. К задачам 11-5, 11-6.

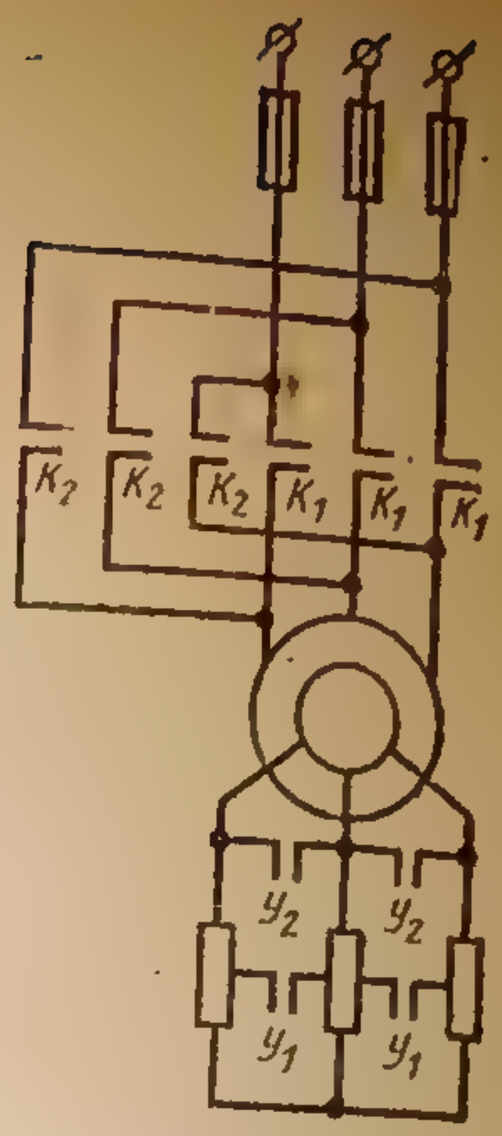


Рис. 11-11. К задачам 11-5, 11-6.

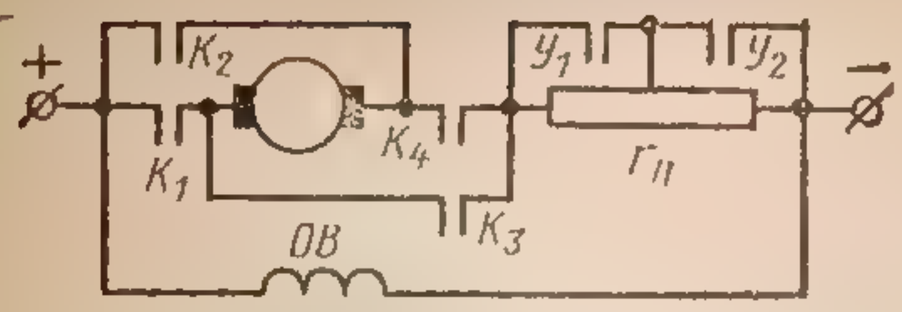


Рис. 11-10. К задачам 11-5, 11-6.

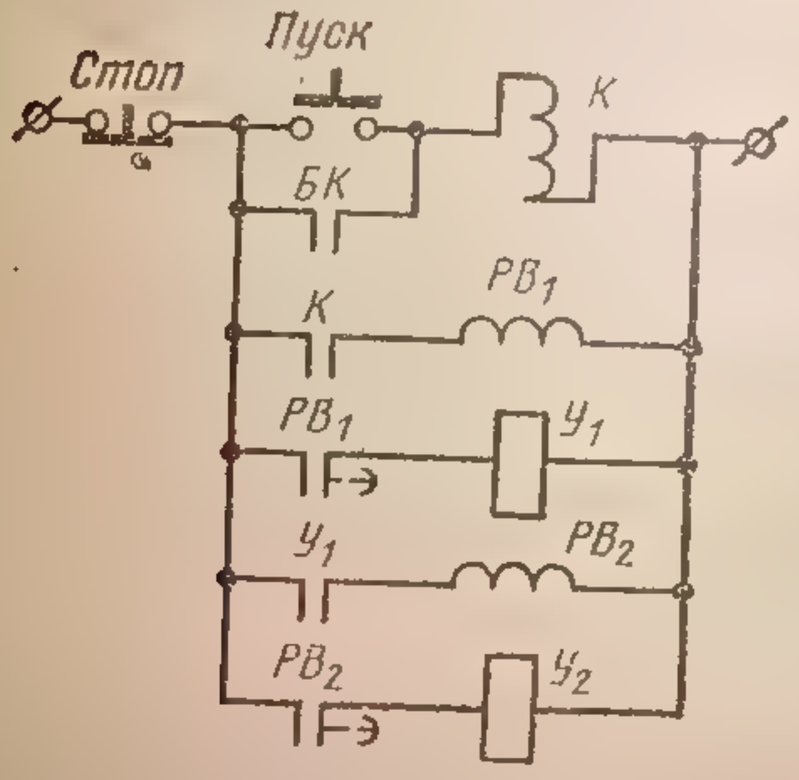


Рис. 11-12. К задачам 11-5, 11-6.

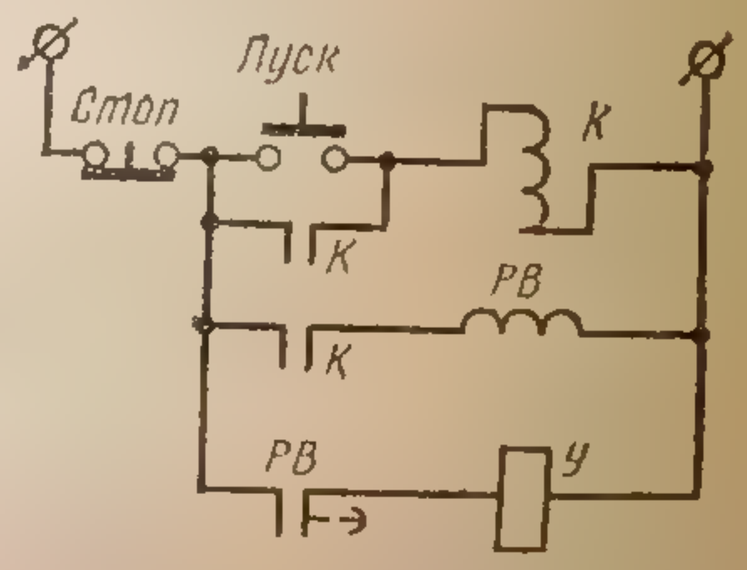


Рис. 11-13. К задачам 11-5, 11-6.

ключения якоря. Схема силовой цепи двигателя представлена на рис. 11-10.

г) Крановый трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором должен иметь контакторный пуск, реверсирование и автоматическое выведение реостата в цепи ротора в две ступени с выдержкой времени. Схема силовой цепи двигателя представлена на рис. 11-1.

Из схем управления, представленных на рис. 11-12—11-14, выбрать необходимую схему управления для случаев «а»—«г» и составить ее описание.

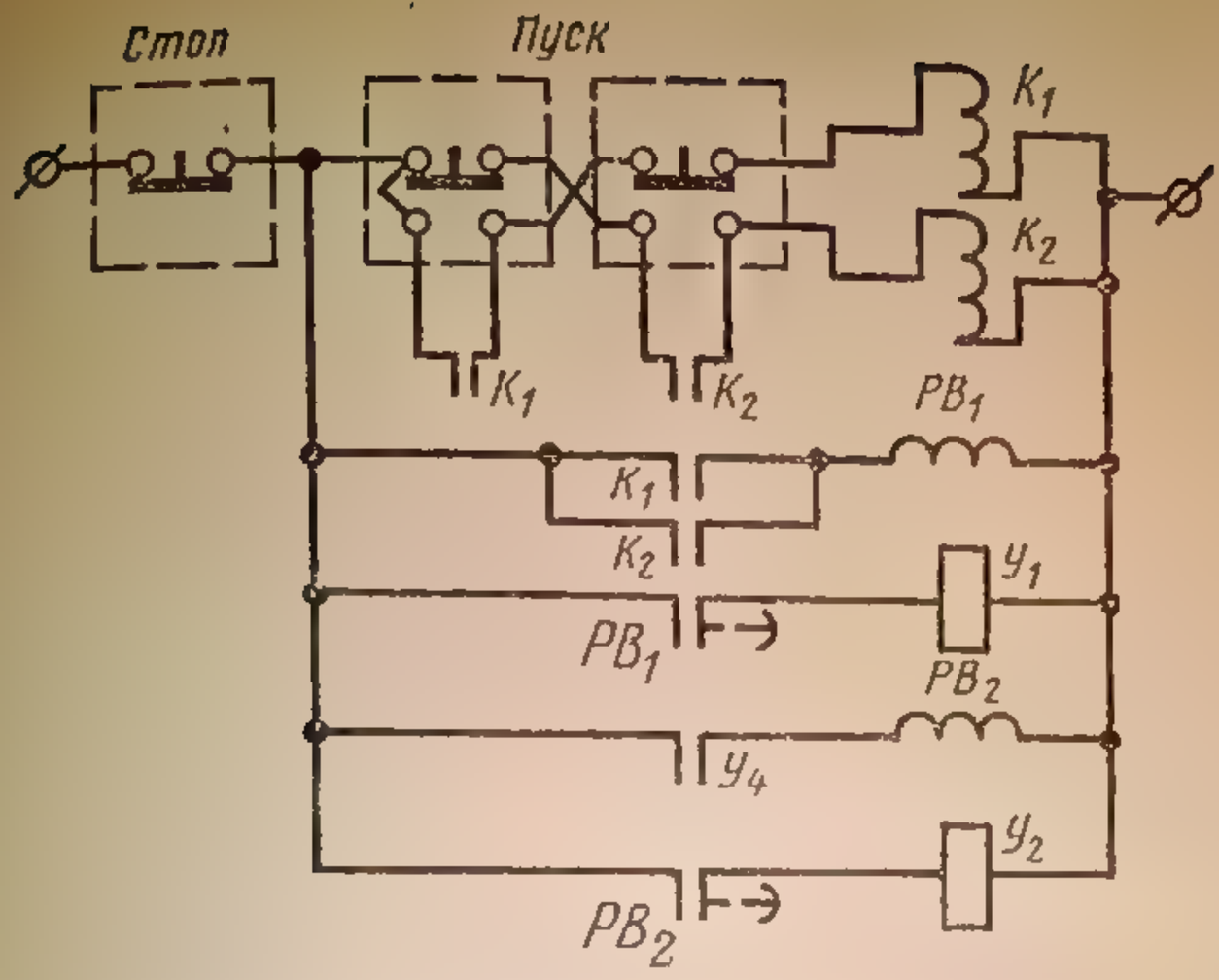


Рис. 11-14. К задачам 11-5, 11-6.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

12-1. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ. ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЛАМПОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

12-1*. Вольт-амперная (анодная) характеристика диода снята по схеме рис. 12-1, *а* и представлена на рис. 12-1, *б*. Определить анодный ток и мощность, выделенную на аноде, число электронов, эмиттируемых с катода в 1 с, и скорость движения их в междуэлектродном пространстве, если анодное напряжение $U_a=50$ В.

Анализ и решение

По характеристике (рис. 12-1, *б*) видно, что анодному напряжению 50 В соответствует анодный ток $I_a=400$ мА. Тогда мощность, выделенная на аноде, $P_a=U_aI_a=50\cdot0{,}4=20$ Вт.

Через число электронов N, эмиттированных с катода в 1 с, и заряд электрона e_0 анодный ток может быть выражен формулой $I_a=e_0N$. Заряд электрона $e_0=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл. Отсюда

$$N=\frac{I}{e_0}=\frac{400\cdot10^{-3}}{1{,}6\cdot10^{-19}}=250\cdot10^{18}\text{ электронов/с.}$$

Кинетическая энергия электрона, движущегося в междуэлектродном пространстве под действием сил электрического поля, выразится $m_0v^2/2=e_0U_a$, где m_0 — масса электрона ($m_0=0{,}9\cdot10^{-30}$ кг); v — скорость электрона. Отсюда

$$v=\sqrt{\frac{2e_0U_a}{m_0}}=\sqrt{\frac{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot50}{0{,}9\cdot10^{-30}}}=4{,}2\cdot10^6\text{ м/с.}$$

12-2*. Двухэлектродная лампа с подогревным катодом используется в качестве выпрямителя (кенотрона) в схемах одно- и двухполупериодного выпрямления (рис. 12-2, *а* и 12-3, *а*). Определить в общем виде для обеих схем максимальное обратное напряжение на диоде и отношения напряжений и токов по показаниям включенных в цепи измерительных приборов электромагнитной и магнитоэлектрической систем.

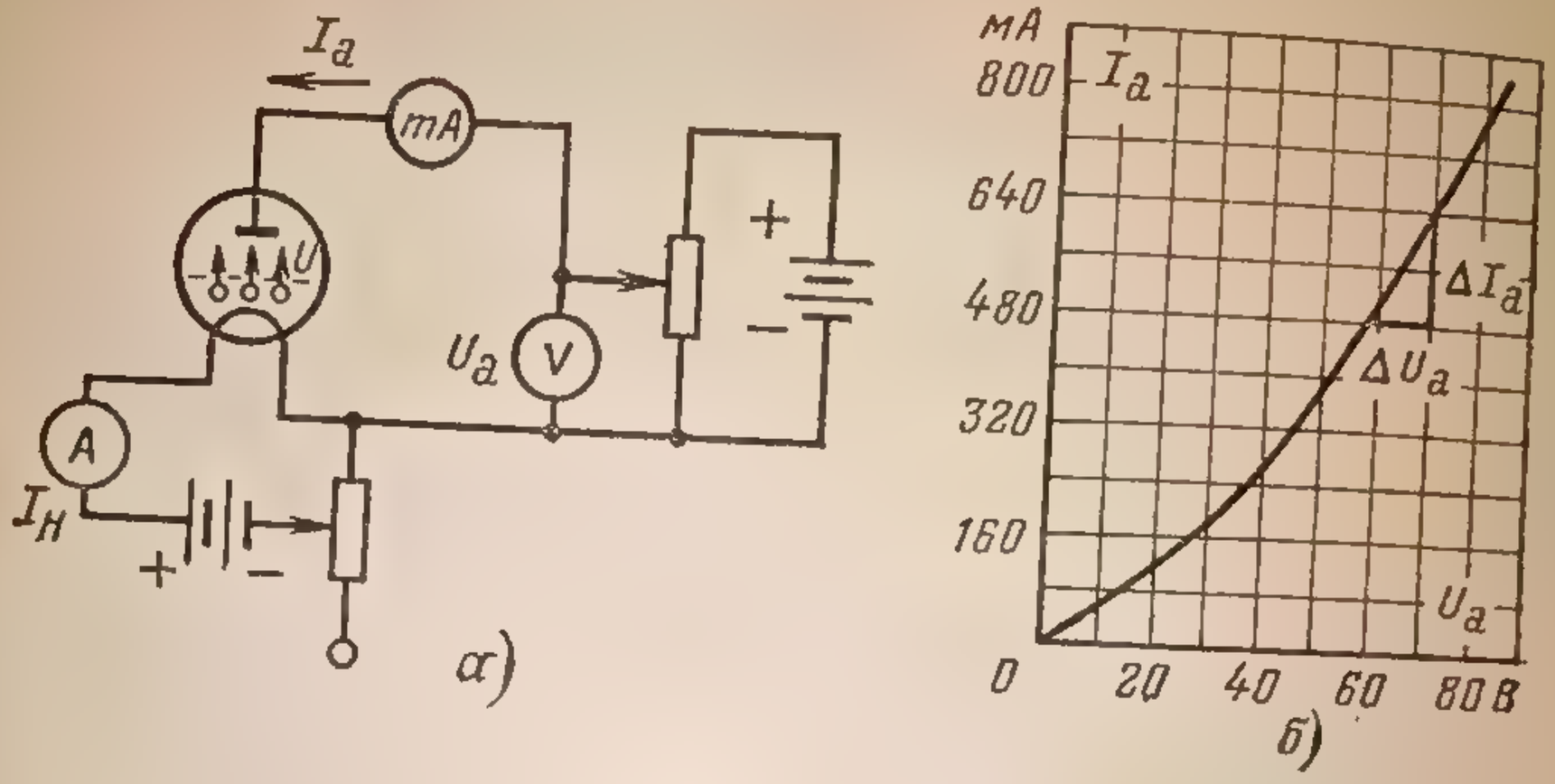


Рис. 12-1. К задаче 12-1.

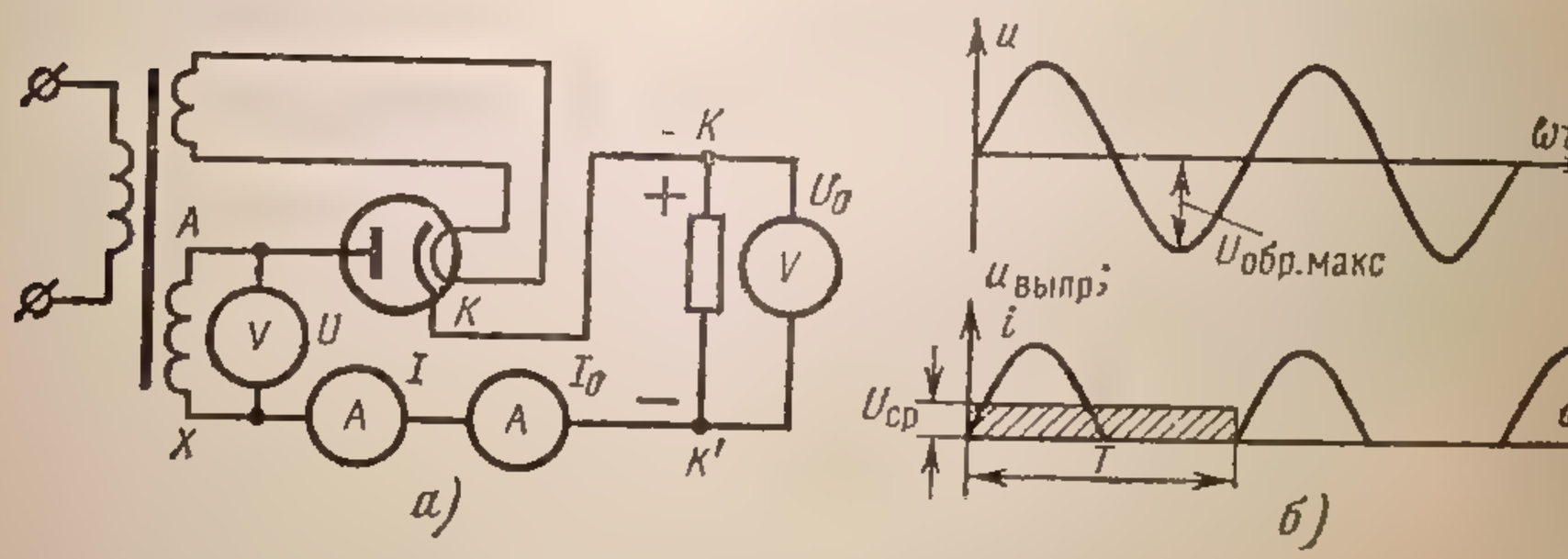


Рис. 12-2. К задаче 12-2.

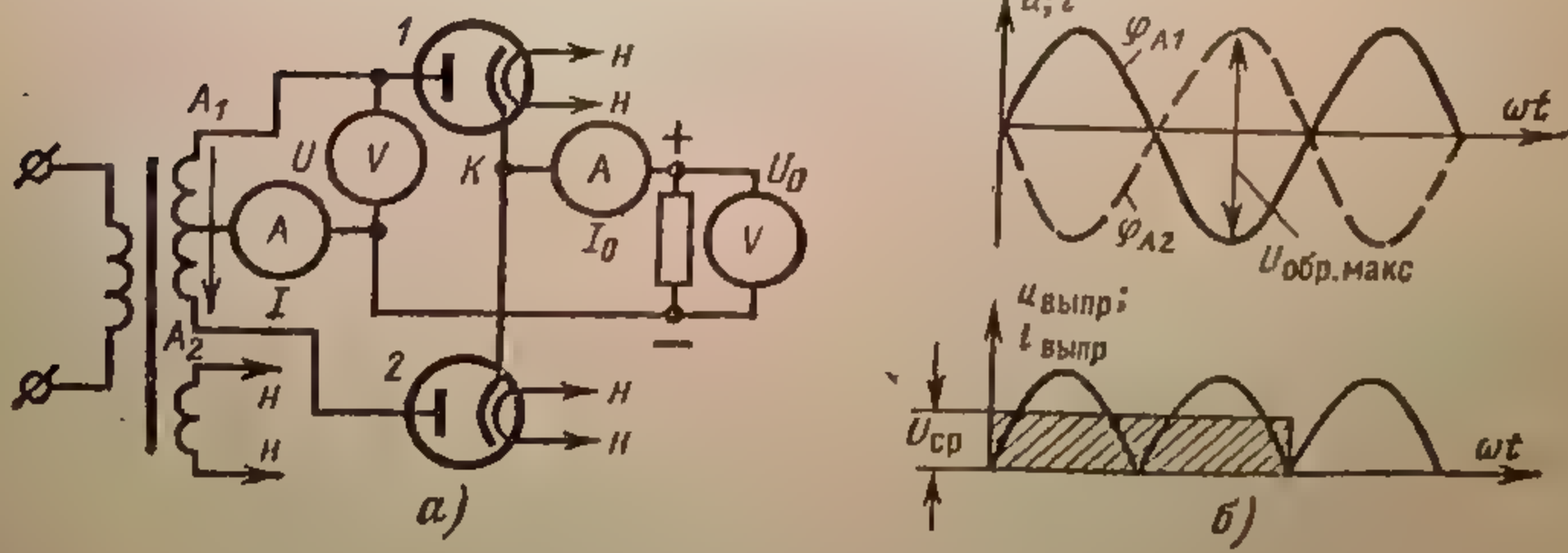


Рис. 12-3. К задаче 12-2.

Анализ и решение

В схемах выпрямления используется основное вентильное свойство диодов, т. е. способность их пропускать ток только в одном направлении, при положительном потенциале анода. При изменении направления электрического поля в пространстве между анодом и катодом ток в цепи практически отсутствует. Однако, если обратное напряжение превысит некоторую величину, на которую диод рассчитан, электроны будут вырываться с поверхности анода (явление автоэлектронной эмиссии) и притягиваться к катоду, в цепи будет протекать обратный ток, диод потеряет свое вентильное свойство, что может также повлечь за собой разрушение катода бомбардирующими его электронами.

При однополупериодном выпрямлении (рис. 12-2, *а*) и синусоидальном напряжении на выходе трансформатора (зажимы AX) $u = U_м \sin \omega t$ выпрямленное напряжение (на зажимах KK') будет пульсирующим. Кривые переменного и выпрямленного напряжений представлены на рис. 12-2, *б*. Максимальное обратное напряжение, как видно из графиков, $U_{обр.макс} = U_м$, где $U_м$ — амплитуда переменного напряжения.

Вольтметр электромагнитной системы покажет действующее значение переменного синусоидального напряжения

$$U = U_{AB} = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ U_м.$$

Вольтметр магнитоэлектрической системы покажет среднее значение выпрямленного напряжения за период U_0.

На рис. 12-2, *б* заштрихованный прямоугольник имеет в соответствующем масштабе основание, равное периоду переменного напряжения, и высоту, равную среднему значению выпрямленного напряжения. Площадь прямоугольника (за период) равна площади полуволны напряжения (полупериода), т. е.

$$U_0 T = \int_0^{T/2} u\, dt.$$

Отсюда среднее выпрямленное напряжение

$$U_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} u\, dt.$$

Подставляя $u = U_м \sin \omega t$ и интегрируя, получим $U_{ср} = U_0 = 0{,}318\ U_м$.

Теперь можно определить требуемое отношение напряжений при однополупериодном выпрямлении:

$$\frac{U_0}{U} = \frac{0{,}318 U_м}{0{,}707 U_м} = 0{,}45.$$

Отношение токов I_0/I для цепи рис. 12-2, *а* получится иным, так как через оба амперметра электромагнитной и магнитоэлектрической

систем проходит в течение периода только одна полуволна выпрямленного тока (рис. 12-2, *б*).

Амперметр электромагнитной системы покажет действующее значение I выпрямленного тока за период $\left(I=I_м/\sqrt{2}\right)$. При прохождении переменного тока в одну половину периода среднее значение квадрата тока за период уменьшится в 2 раза, т. е. $I^2=(i^2)_{ср}=I_2^2/4$. Отсюда $I=I_м/2=0{,}5I_м$.

Амперметр магнитоэлектрической системы покажет среднее значение выпрямленного тока за период $I_{ср}=I_0=0{,}318I_м$. Требуемое отношение токов получится равным

$$\frac{I_0}{I}=\frac{0{,}318I_м}{0{,}5I_м}=0{,}637.$$

При двухполупериодном выпрямлении (рис. 12-3, *а*) кривые переменных и выпрямленного напряжений представлены на рис. 12-3, *б*.

Если точку O вторичной обмотки трансформатора (рис. 12-3, *а*) принять за точку нулевого потенциала, то кривые φ_{A1} и φ_{A2} на рис. 12-3, *б* будут представлять собой графики изменения потенциалов точек A_1 и A_2. При направлении э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора, как показано на рис. 12-3, *а* сплошной стрелкой (одна половина периода), ток пройдет через диод *1*, нагрузочный резистор и половину обмотки трансформатора OA_1. На диод *2* ложится в это время обратное напряжение $u_{обр}=\varphi_к-\varphi_{A2}$.

Если пренебречь падением напряжения в диоде *1**, проводящем ток, то потенциал катода $\varphi_к$ можно принять равным потенциалу анода φ_{A1}. Тогда $u_{обр}=\varphi_{A1}-\varphi_{A2}$. Во вторую половину периода будет работать другая половина обмотки трансформатора, проводящим ток окажется диод *2*, а диод *1* будет находиться под обратным напряжением: $u_{обр}=\varphi_{A2}-\varphi_{A1}$. Так как каждую половину периода работает только половина вторичной обмотки трансформатора, максимальное рабочее напряжение будет равно половине максимального вторичного напряжения трансформатора $U_м=U_{2м}/2$, а максимальное обратное напряжение $U_{обр.м}=2U_м$ (рис. 12-3, *б*).

Через амперметры электромагнитной и магнитоэлектрической систем, показанные на схеме рис. 12-3, *а*, будет протекать выпрямленный пульсирующий ток, график которого получится таким же, как график выпрямленного напряжения (рис. 12-3, *б*) В этом легко убедиться, если проследить за направлением тока в цепи при переменном направлении э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора.

Так как действующие значения тока и напряжения определяются квадратами этих величин, наличие положительной или отрицательной полуволны в кривой переменного напряжения и выпрямленного тока не будет оказывать влияния на показания приборов электромагнитной системы. Поэтому показания вольтметра и амперметра электромагнитной системы получатся: $U=0{,}707\,U_м$; $I=0{,}707\,I_м$.

Вольтметр и амперметр магнитоэлектрической системы покажут соответственно средние значения выпрямленных напряжения и тока.

Высота заштрихованного прямоугольника на рис. 12-3, *б*, равновеликого двум полуволнам выпрямленного напряжения или тока,

---

* В действительности падение напряжения в вакуумном диоде может быть весьма значительным и доходить до 30% рабочего напряжения.

определяет в заданном масштабе их средние значения. Из равенства площадей следует

$$U_0 T = 2 \int_0^{T/2} u\,dt \text{ и } U_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u\,dt.$$

Подставляя $u = U_м \sin \omega t$ и интегрируя, получаем $U_{ср} = U_0 = 0{,}637\, U_м$.

И аналогично для тока $I_{ср} = I_0 = 0{,}637\, I_м$.

Требуемые отношения получатся:

$$\frac{U_0}{U} = \frac{0{,}637 U_м}{0{,}707 U_м} = 0{,}9; \quad \frac{I_0}{I} = \frac{0{,}637 I_м}{0{,}707 I_м} = 0{,}9.$$

Вопросы и упражнения к задачам 12-1, 12-2

1. Двухэлектродная лампа имеет анодную характеристику, представленную на рис. 12-1, *б*. Определить внутреннее сопротивление диода $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ и крутизну его характеристики $S = \Delta I_a / \Delta U_a$.

2. а) Действующее значение тока при однополупериодном выпрямлении $I = 157$ мА. Определить среднее значение выпрямленного тока.

б) Среднее значение выпрямленного тока 0,1 А. Определить действующее значение тока.

3. Решить пример 2 для схемы двухполупериодного выпрямления.

4. Напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора $U_2 = 420$ В. Определить среднее выпрямленное напряжение на выходе выпрямителя для схем: а) однополупериодного; б) двухполупериодного выпрямления (схема трансформатора с выведенной нулевой точкой).

5. Кенотронный выпрямитель должен иметь на выходе среднее выпрямленное напряжение $U_0 = 150$ В. Определить напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора выпрямителя (действующее значение) для схем: а) рис. 12-2, *а*; б) рис. 12-3, *а*.

6. Среднее значение выпрямленного тока: а) 100; б) 200; в) 300; г) 400 мА. Сопротивление нагрузки 3 кОм. Определить, для какого из указанных токов мощность, выделенная в сопротивлении нагрузки, будет: при однополупериодном выпрямлении 300 Вт; при двухполупериодном выпрямлении 600 Вт.

Примечание. Мощность определяется по действующему значению выпрямленного тока $P = I^2 r_н$.

12-3. Напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора (действующее значение) 200 В при однополупериодном выпрямлении (рис. 12-2, *а*), 2·200 В при двухполупериодном выпрямлении (рис. 12-3, *а*). Определить среднее выпрямленное напряжение и максимальное обратное напряжение для обеих схем выпрямления.

Условие 1. Падением напряжения в кенотроне пренебречь.

Условие 2. Падение напряжения в кенотроне принять равным 20% максимального выпрямленного напряжения $U_м$.

12-4. Среднее значение выпрямленных тока и напряжения, полученных от выпрямителя: $I_0 = 0{,}5$ А; $U_0 = 120$ В. Определить мощность, потребляемую в нагрузочном резисторе, при выпрямлении по схеме рис. 12-2, *а* и по схеме рис. 12-3, *а*.

12-5. При многофазном выпрямлении и синусоидальном переменном напряжении среднее значение выпрямленного напряжения U_0 может быть определено по формуле

$$U_0 = U_м \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m},$$

где m — число фаз; $U_м$ — амплитуда переменного напряжения. Определить отношение $U_0/U_м$ при двухфазном (рис. 12-3, *а*), трехфазном (рис. 12-4) и шестифазном выпрямлении.

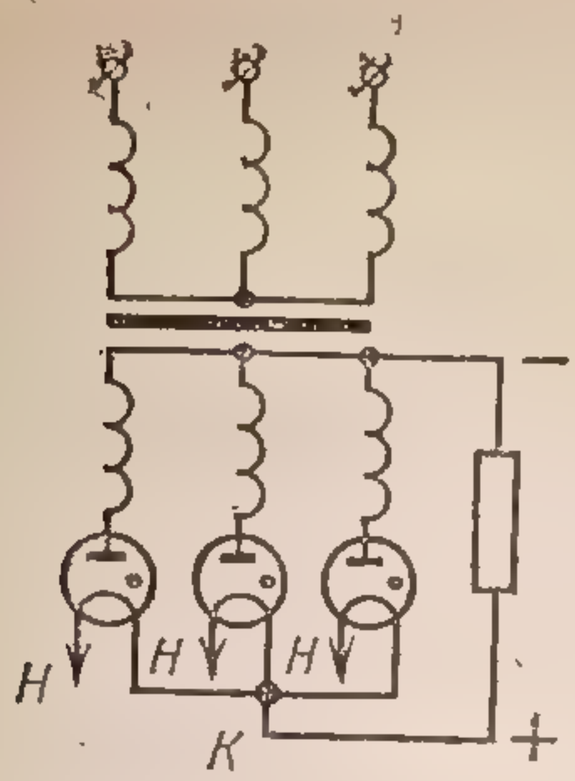


Рис. 12-4. К задаче 12-5.

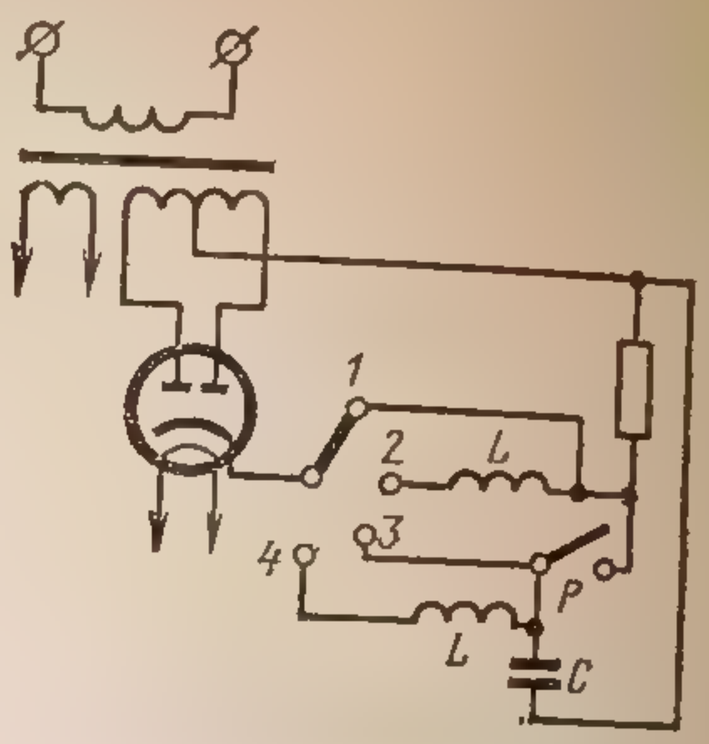


Рис. 12-5. К задаче 12-6.

12-2. ФИЛЬТРЫ

12-6*. Двуханодный кенотрон 5Ц4С включен по схеме трансформатора с выведенной нулевой точкой (рис. 12-5). Действующее значение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора 2·100 В. Разложить графически ток $i_{общ}$ и напряжение $u_{общ}$ на выходе кенотрона (до фильтра) на постоянную и переменную составляющие. Определить максимальные напряжение и ток в нагрузочном резисторе $r_н = 3$ кОм при положениях переключателя *1*, *2* и разомкнутом рубильнике *P*, положениях *3*, *4* и замкнутом рубильнике *P*. Принять, что для переменной слагающей напряжения частота f велика, вследствие чего $x_L = 2\pi f L \to \infty$, $x_C = \frac{1}{2\pi f C} \to 0$. Для постоянной слагающей $f = 0$, $x_L = 0$ и $x_C = \infty$.

Анализ и решение

При установке переключателя в положение *1* на зажимах нагрузочного резистора будет пульсирующее напряжение с амплитудой $U_м = 400 \cdot 1{,}41 = 562$ В. В цепи будет протекать пульсирующий ток с амплитудой $I_м = U_м / r_н = 188$ мА. Графики тока и напряжения и их переменные и постоянные составляющие показаны на рис. 12-6, *а—в*.

При установке переключателя в положение *2* и разомкнутом рубильнике *P* последовательно с нагрузочным резистором будет включен реактор.

Если разложить кривую пульсирующего напряжения на постоянную и переменную составляющие $u_{общ} = U_0 + u$ (рис. 12-6, *а—в*), то

для переменной составляющей напряжения, если учитывать, что $x_L \to \infty$, переменная составляющая тока $i \to 0$. Следовательно, реактор, соединенный последовательно с нагрузочным резистором, можно рассматривать как фильтр переменной составляющей тока. Общее выпрямленное напряжение с амплитудой 562 В (рис. 12-6, *а*) распределится между двумя последовательно соединенными участками; на реактор ляжет переменная составляющая напряжения (рис. 12-6, *б*), на нагрузочный резистор — постоянная составляющая (рис. 12-6, *в*), равная среднему значению выпрямленного напряжения $U_0 = 0{,}9 \cdot 400 = 360$ В. В цепи будет протекать постоянный ток $I_0 = U_0/r_н = 120$ мА.

При установке переключателя в положение *3* и замкнутом рубильнике *Р* параллельно с нагрузочным резистором будет включен конденсатор. При бесконечно большом сопротивлении нагрузочного

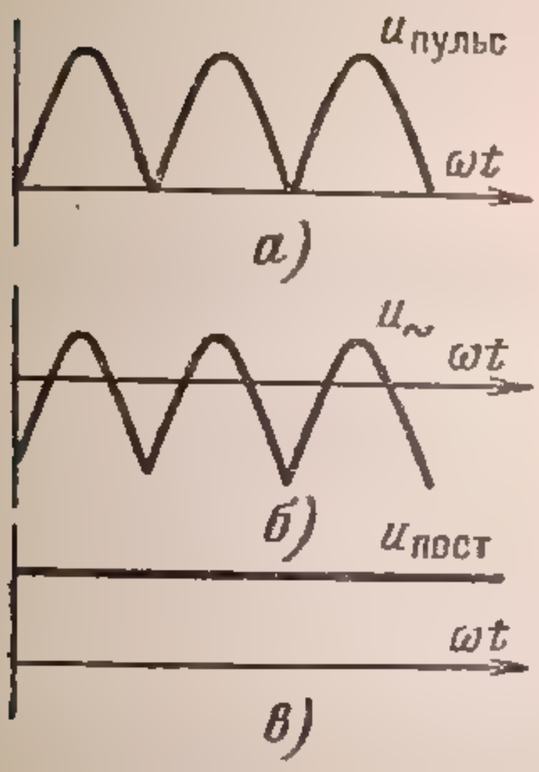


Рис. 12-6. К задаче 12-6.

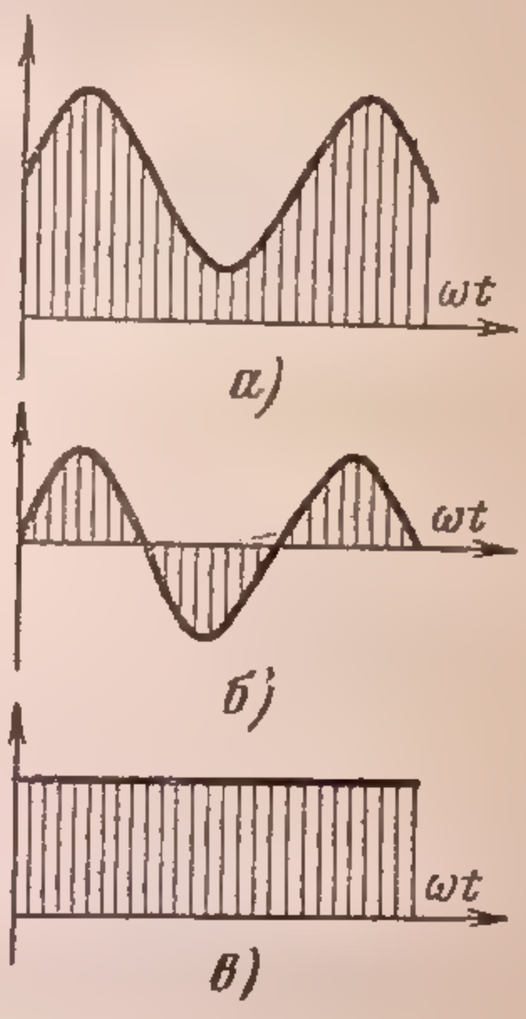


Рис. 12-7. К задаче 12-6.

резистора конденсатор зарядится и на нем будет постоянное напряжение. Если сопротивление уменьшить, то в те части обоих полупериодов, когда напряжение на конденсаторе меньше, чем мгновенное напряжение полуобмотки трансформатора, он будет разряжаться на резистор. Выпрямленное напряжение (так же как и ток), будет содержать постоянную и переменную составляющие. Из этого следует, что конденсатор, включенный параллельно с нагрузочным резистором, можно рассматривать как фильтр переменной составляющей напряжения.

При установке переключателя в положение *4* и замкнутом рубильнике *Р* присоединен комбинированный, так называемый Г-образный фильтр. Последовательно присоединенная катушка индуктивности фильтрует переменную составляющую тока, а параллельно присоединенная емкость — переменную составляющую напряжения. Таким образом, здесь ток и напряжение имеют только одну постоянную составляющую: $I_0 = 120$ мА и $U_0 = 360$ В (рис. 12-6, *в*).

Вопросы и упражнения к задаче 12-6

1. В условиях задачи 12-6 определить максимальное обратное напряжение анода.

2. Два последовательно соединенных источника в цепи с активным сопротивлением создают в общем случае напряжение и ток, состоящие из двух составляющих постоянной и переменной: $u_{общ}=U_0+U_м \sin \omega t$, $i_{общ}=I_0+I_м \sin \omega t$. Графики этих величин и их составляющих представлены на рис. 12-7, *а—в*. Какой из этих графиков будет вычерчиваться на экране электронного осциллографа [1], если входные выводы его присоединены к выводам активного сопротивления. Частота источника переменного тока $f \to \infty$.

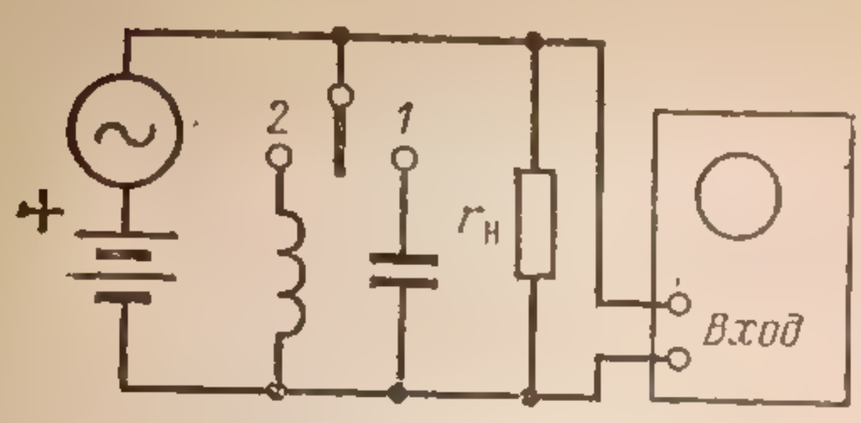


Рис. 12-8. К задачам 12-6, 12-7.

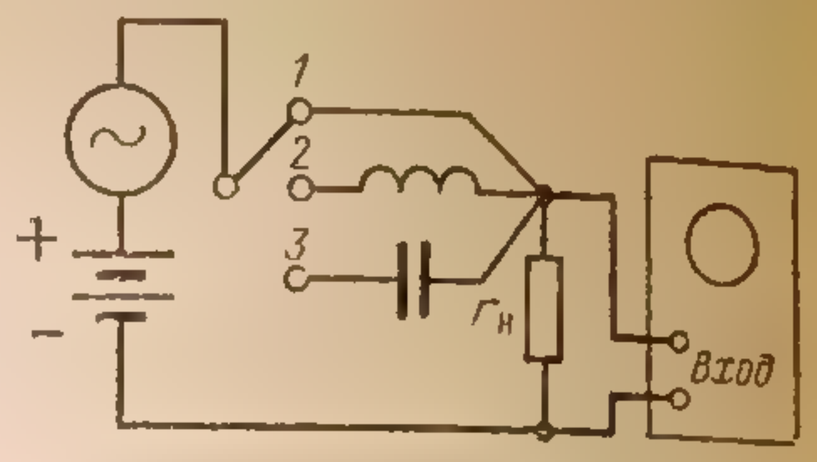


Рис. 12-9. К задачам 12-6, 12-8.

Задачу решить: а) для схемы рис. 12-8 при нейтральном положении переключателя, а также при положении *1* и *2*;

б) для схемы 12-9 при положениях переключателя *1—3*.

12-7. Определить напряжение и ток в нагрузочном резисторе $r_н=5$ кОм, если в нейтральном положении переключателя (рис. 12-8) напряжение выражается уравнением $u_{общ}=100+60 \sin \omega t$.

Частота источника переменного тока $f \to \infty$.

Задачу решить для положений переключателя *1, 2*.

12-8. Определить ток в цепи и напряжения на ее участках U_a и U_L (или U_c), если активное сопротивление цепи $r_н=5$ кОм, частота источника переменного тока $f \to \infty$, а в положении переключателя *1* (рис. 12-9) напряжение на выводах цепи выражается уравнением $u_{общ}=100+60 \sin \omega t$. Задачу решить для положений переключателя *2* и *3*.

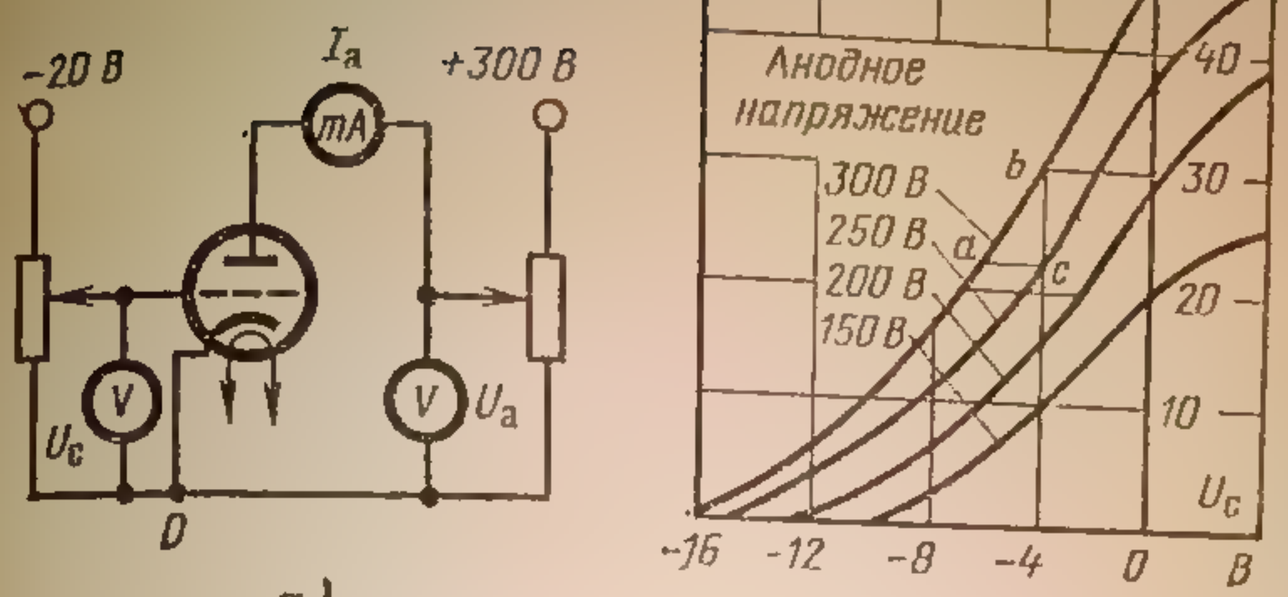
12-3. ТРИОД, МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ. УСИЛИТЕЛИ, ГЕНЕРАТОРЫ

12-9*. Анодно-сеточные характеристики триода 6С2С, снятые по схеме рис. 12-10, *а*, представлены на рис. 12-10, *б*. Определить по этим характеристикам параметры триода.

Анализ и решение

Параметры триода могут быть определены из характеристического треугольника *abc*, показанного на рис. 12-10, *б*. Высота этого треугольника *bc* характеризует изменение анодного тока $\Delta I_a=8$ мА, основание *ac* — изменение сеточного напряжения $\Delta U_c=2$ В, изменение анодного напряжения согласно графику составляет $\Delta U_a=300-250=50$ В. Теперь можно определить параметры триода: внутреннее сопротивление триода $r_i=\dfrac{\Delta U_a}{\Delta I_a}=\dfrac{50}{7{,}5}=6{,}7$ кОм; крутизна ха-

[1] Электронный осциллограф — прибор, служащий для визуального наблюдения быстро протекающих процессов в электрических цепях.



а) б)

Рис. 12-10. К задаче 12-9.

рактеристики $S = \dfrac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \dfrac{7{,}5}{2} = 3{,}75$ мА/В; коэффициент усиления

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{50}{2} = 25.$$

Кроме того, должно соблюдаться равенство $\mu = r_i S = 6{,}7 \cdot 10^3 \times 3{,}75 \cdot 10^{-3} = 25$.

12-10*. Схема усилителя на триоде 6С2С представлена на рис. 12-11, анодные характеристики триода показаны на рис. 12-12. Построить характеристику усилителя и вывести в общем виде выражения для анодного тока ($i_{a.общ}$), анодного напряжения ($u_{a.общ}$) и коэффициента усиления (k_y).

Анализ и решение

Переменное напряжение сигнала ($u_{вх}$), поданное на сетку триода, вызовет изменения анодного тока, а следовательно, и анодного напряжения ($u_{a.общ}$).

$r_{см}$ и $C_{см}$ (рис. 12-11) служат для автоматической подачи на сетку лампы постоянного отрицательного потенциала (сеточного смещения), при котором работа лампы будет происходить в прямолинейной части анодно-сеточных характеристик (рис. 12-10) без линейных искажений*. Анодный ток состоит из двух составляющих — постоянной и переменной. Последняя будет пропущена через емкость $C_{см}$, а постоянная составляющая создаст в резисторе $r_{см}$ падение напряжения $U_{c0} = I_{a0} r_{см}$. Емкость C_{p1} не пропустит постоянную составляющую через источник сигнала, а для переменного напряжения $u_{вх}$ $x_{Cp1} = 0$. Тогда, выражая напряжения через разности потенциалов, получаем $u_{вх} = \varphi_c - \varphi_0$, $U_{c0} = \varphi_к - \varphi_0$ и напряжение между сеткой и катодом $u_{c.общ} = \varphi_c - \varphi_к = -U_{c0} + u_{вх}$. Сопротивление r_c служит для передачи на сетку постоянного сеточного смещения.

Пусть э. д. с. анодной батареи E_a. Проведем из конца отрезка E_a на анодных характеристиках триода вертикальную прямую (рис. 12-12). Затем под углом к этой линии, тангенс которого про-

---

* При положительных потенциалах на сетке возникают сеточные токи, характеристики загибаются (рис. 12-10) и изменение выходного напряжения получается искаженным.

порционален анодному сопротивлению r_a, проведем другую прямую, которая пересечет семейство анодных характеристик в ряде точек. Это и будет характеристика усилительного каскада. Пользуясь этой характеристикой и анодными характеристиками, легко построить кривые изменения анодного тока и анодного напряжения. На рис. 12-12 такое построение выполнено для постоянного напряжения сеточного смещения $U_{c0}=-4$ В и при изменении сеточного напряжения от -6 до -2 В*. Из построения видно, что $i_{a.общ}=I_{a0}+i_a$; $u_{a.общ}=E_a-i_{a.общ}r_a$ или $u_{a.общ}=E_a-(I_{a0}+i_a)r_a=(E_a-I_{a0}r_a)-i_a r_a$, откуда $u_{a.общ}=U_{a0}-u_a$. Емкость разделяющего конденсатора C_{p2} (рис. 12-11) не пропускает постоянную составляющую напряжения и дает возможность получить на выходе только переменную составляющую $u_{вых}=u_a$.

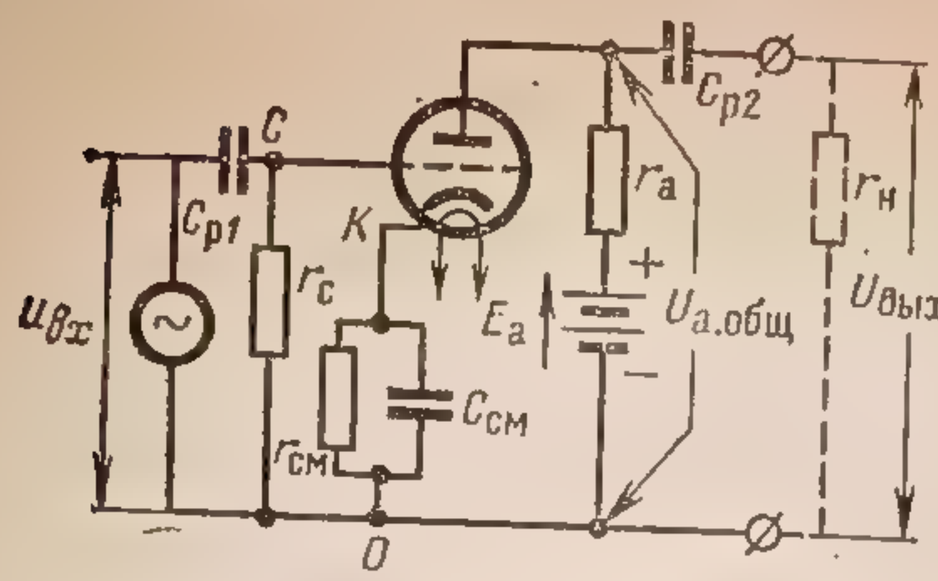


Рис. 12-11. К задачам 12-10, 2-16.

Из выражения для основных параметров триода $r_i=\Delta U_a/\Delta I_a$ и $\mu=\Delta U_a/\Delta U_c$ следует $\Delta I_a=\Delta U_a/r_i=\mu\Delta U_c/r_i$. При наличии сопротивления r_a в анодной цепи $\Delta I_a=\dfrac{\mu\Delta U_c}{r_i+r_a}$. Для переменных составляющих, как видно из рис. 12-11 (зачерненный треугольник), $\Delta I_a=i_a$; $\Delta U_a=u_a$ и, очевидно, $\Delta U_c=u_c$, поэтому $i_a=\dfrac{\mu u_c}{r_i+r_a}$, или для действующих значений переменных синусоидальных составляющих

$$I_a=\frac{\mu U_c}{r_i+r_a} \text{ и } U_a=I_a r_a=\mu U_c\frac{r_a}{r_i+r_a}.$$

Учитывая, что $u_c=u_{вх}$ и $u_a=u_{вых}$, можно выразить коэффициент усиления усилителя

$$k_y=\frac{u_{вых}}{u_{вх}}=\mu\frac{r_a}{r_i+r_a}.$$

Вопросы и упражнения к задачам 12-9 и 12-10

1. Пользуясь характеристическим треугольником, показанным на анодных характеристиках триода 6С2С (рис. 12-12), определить ΔI_a, ΔU_c и ΔU_a. По этим данным определить параметры лампы S, r_i и μ. Сравнить с решением задачи 12-9 по анодно-сеточным характеристикам.

2. Для изменения анодного тока на 10 мА необходимо изменить анодное напряжение на 40 В или же сеточное напряжение на 2,5 В. Определить параметры триода S, r_i и μ.

3. Крутизна характеристики триода 4 мА/В. Вычислить внутреннее сопротивление триода, если коэффициент усиления $\mu=40$.

---

* Для упрощения полагаем, что напряжение сигнала ($u_{вх}$) изменяется синусоидально.

4. Крутизна характеристики триода 3,5 мА/В. Как изменится анодный ток лампы (увеличится или уменьшится) и насколько, если напряжение на сетке увеличится на 3 В.

5. Крутизна характеристики триода 2 мА/В. При сеточном напряжении $u_c = -15$ В анодный ток 20 мА. Определить, при каком сеточном напряжении анодный ток будет равен 50 мА.

6. Внутреннее сопротивление триода $r_i = 10$ кОм, коэффициент усиления $\mu = 30$. Определить, при каком анодном сопротивлении: а) 0; б) 5 кОм; в) 10 кОм; г) ∞ — коэффициент усиления k_y усилителя на триоде будет равен 30; 15; 0; 10.

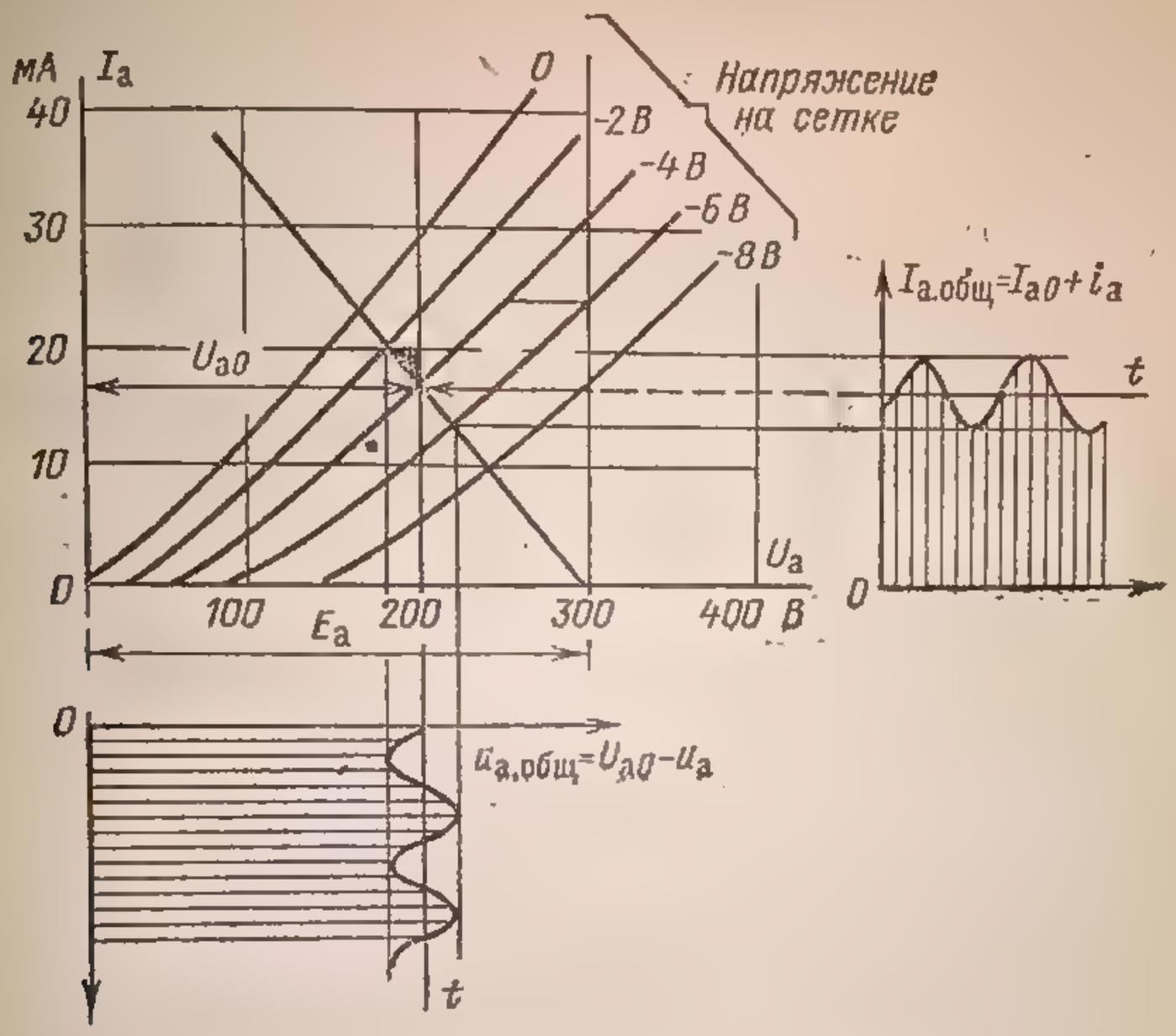


Рис. 12-12. К задачам 12-10, 12-16.

12-11. Трехэлектродная лампа используется в схеме усилителя (рис. 12-11). Напряжение на сетке и анодный ток выражаются уравнениями $u_{c.общ} = -4 + 3 \sin \omega t$ В; $i_{a.общ} = 10 + 6 \sin \omega t$ мА.

Крутизна характеристики триода 2 мА/В, внутреннее сопротивление 15 кОм. Определить действующие значения входного и выходного напряжений (переменных составляющих), коэффициент усиления усилителя k_y. Анодное сопротивление принять равным 10 кОм.

12-12. Трехэлектродная усилительная лампа обладает следующими параметрами: статический коэффициент усиления $\mu = 30$, внутреннее сопротивление лампы $r_i = 1$ кОм. В анодную цепь включено сопротивление $r_a = 5$ кОм, а к сетке подведено переменное напряжение, изменяющееся по закону $u_{c.общ} = -4 + 4 \sin \omega t$ В. Определить действующее значение переменной составляющей анодного напряжения и коэффициент усиления усилителя k_y.

12-13. Трехэлектродная усилительная лампа имеет крутизну характеристики 1,5 мА/В. К сетке приложено напряжение $u_{c.общ} = -6 + 3 \sin \omega t$ В. Внутреннее сопротивление триода равно сопротивлению в анодной цепи $r_i = r_a = 10$ кОм.

Определить коэффициент усиления усилителя и написать аналитическое выражение для анодного напряжения ($u_{а.общ}$), если известно, что при сеточном напряжении $u_с=6$ В. анодное напряжение $u_{а0}=200$ В.

12-14. В анодную цепь четырехэлектродной лампы включено активное сопротивление $r_а=50$ кОм. Ток в анодной цепи определяется выражением $i_{а.общ}=200+100\sin\omega t$ мкА. Определить действующее значение переменной слагающей выходного напряжения.

12-15. В анодную цепь четырехэлектродной лампы (тетрод) включено активное сопротивление $r_а=5$ кОм. Рассчитать коэффициент усиления одного каскада усилителя на тетроде, если известно, что амплитуда переменной составляющей анодного тока равна 10 мА, а напряжение на сетке изменяется по закону.

$$u_с=-6+2\sin 2\pi\cdot 10^5 t \text{ В}.$$

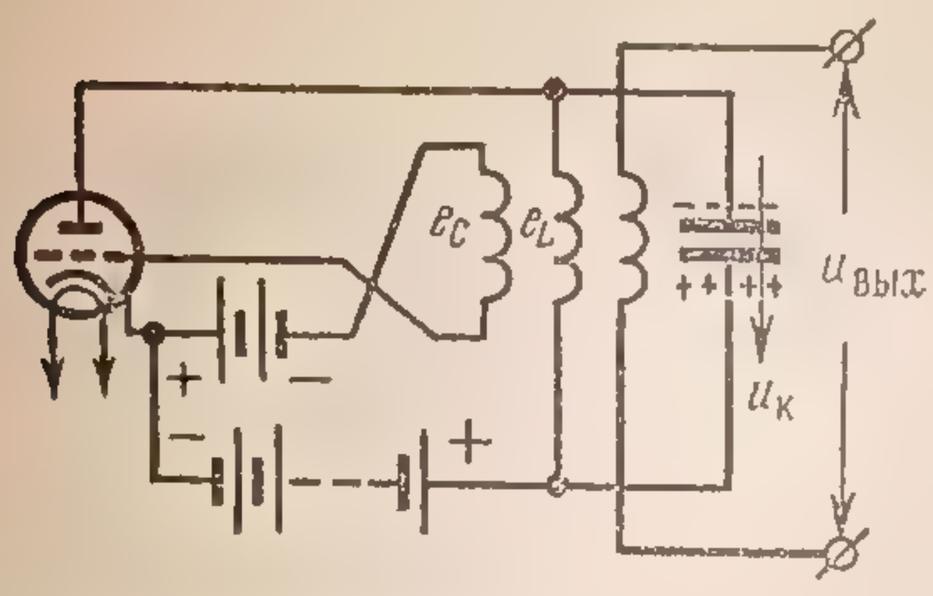


Рис. 12-13. К задачам 12-17, 12-18.

12-16. Трехэлектродная лампа используется в схеме усилителя (рис. 12-11). Пользуясь характеристикой усилительного каскада и кривыми общего анодного тока и анодного напряжения, представленными на рис. 12-12, написать аналитические выражения для $u_{а.общ}$ и $u_{с.общ}$, считая, что переменное напряжение сигнала изменяется по синусоидальному закону. Определить также действующие значения переменных слагающих входного и выходного напряжений, коэффициент усиления и нагрузочное сопротивление в анодной цепи.

12-17. Трехэлектродная лампа применяется в высокочастотном генераторе для создания незатухающих колебаний в индуктивно-емкостном контуре LC (рис. 12-13). В катушке обратной связи индуктируется э. д. с. $e_с$, создающая напряжение между сеткой и катодом. При положительном потенциале на сетке лампа открывается и анодный ток ее подпитывает колебательный контур. Выходное напряжение снимается с третьей индуктивно связанной катушки.

Условие 1. Будет ли происходить подпитка колебательного контура, если при расположении зарядов, показанном на рис. 12-13, конденсатор разряжается, конденсатор заряжается? Решить ту же задачу при изменении знака заряда на обкладках конденсатора.

Указание. Стрелками следует показать направления токов конденсатора $i_к$, катушки i_L, э. д. с. e_L и $e_с$, тогда легко увидеть, в каком случае на сетку лампы подается положительный потенциал и будет протекать анодный ток. При этом следует учесть, что по второму закону Кирхгофа $u_к+e_L=0$ и, следовательно, $u_к=-e_L$, а э. д. с. $e_с$ совпадает по направлению с e_L.

Условие 2. Определить частоту лампового генератора, если колебательный контур имеет индуктивность $L=25$ мГ и емкость $C=25$ мкФ.

Условие 3. Определить, какова должна быть индуктивность колебательного контура высокочастотного генератора, чтобы при емкости в 1 мкФ частота колебаний контура была 5040 Гц.

Условие 4. Определить, какова должна быть емкость колебательного контура высокочастотного генератора, чтобы при индуктивности 10 мГ частота колебаний контура была 1590 Гц.

12-4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

12-18*. На рис 12-14 и 12-15 изображены схемы выпрямления с полупроводниковыми выпрямителями. Проследив за направлением тока в цепи при переменной э. д. с. в обмотке автотрансформатора,

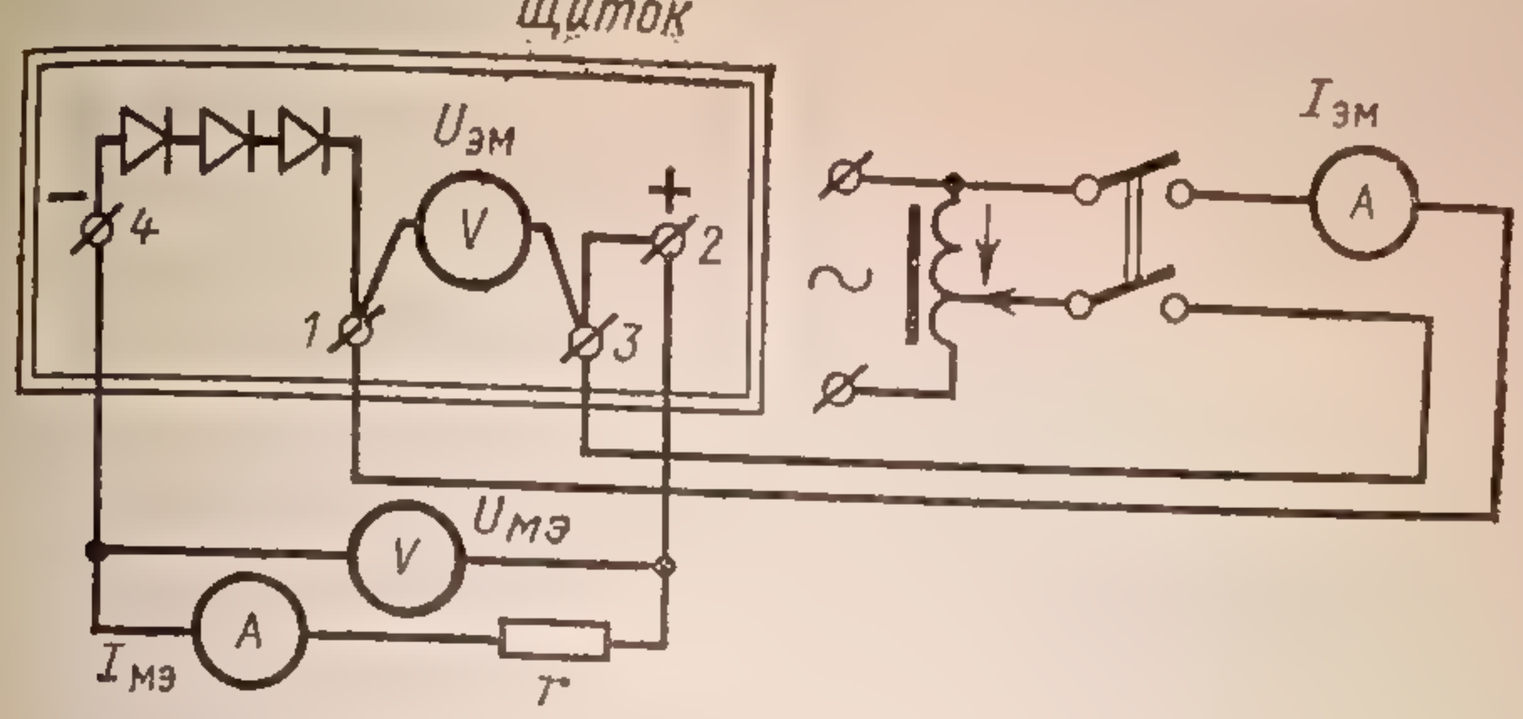


Рис. 12-14. К задаче 12-18.

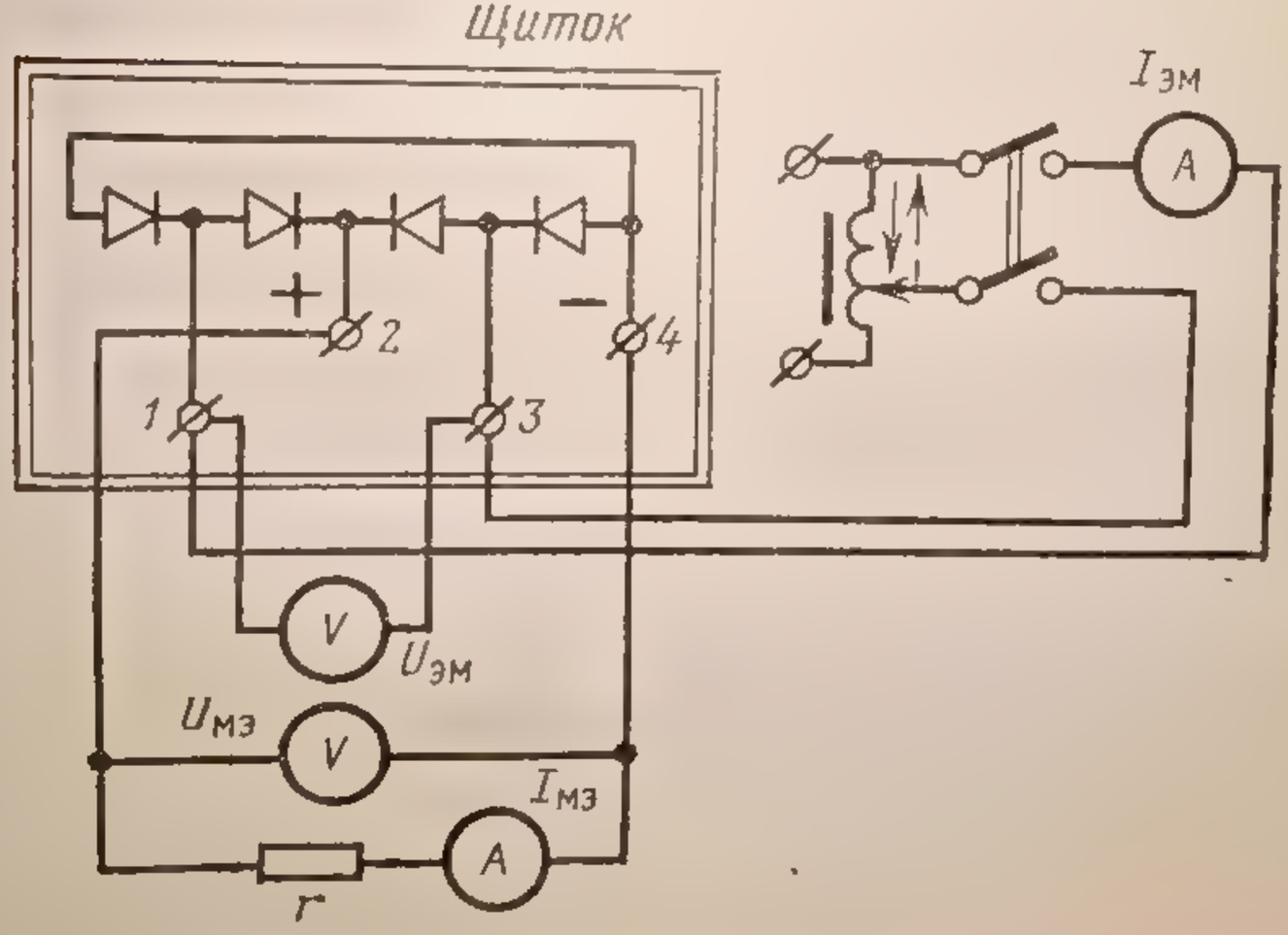


Рис. 12-15. К задаче 12-18.

установить вид выпрямления для обеих схем и определить по показаниям приборов электромагнитной ($U_{эм}$ и $I_{эм}$) и магнитоэлектрической ($U_{мэ}$ и $I_{мэ}$) систем отношения напряжений и токов $U_{эм}/U_{мэ}$ и $I_{эм}/I_{мэ}$, а также обратное максимальное напряжение, приложенное к выпрямителю.

Анализ и решение

При направлении э. д. с. во вторичной цепи автотрансформатора от верхнего вывода к подвижному контакту (указано на рис. 12-14

стрелкой) ток проходит от подвижного контакта к выводу *3* и далее через вывод *2*, нагрузочный резистор *r*, амперметр магнитоэлектрической системы, вывод *4*, выпрямители, вывод *1*, амперметр электромагнитной системы к обмотке автотрансформатора. В обратном направлении ток проходить не будет, так как это направление является для выпрямителей непроводящим. Следовательно, по схеме рис. 12-14 получается однополупериодное выпрямление. Показания приборов будут такими же, как в аналогичной схеме с двухэлектродной лампой (задача 12-2), т. е. $U_{эм}=0{,}707\,U_м$, $U_{мэ}=0{,}318\,U_м$, $I_{эм}=0{,}5\,I_м$ и $I_{мэ}=0{,}318\,I_м$, где $U_м$ и $I_м$ — амплитудные значения напряжения и тока.

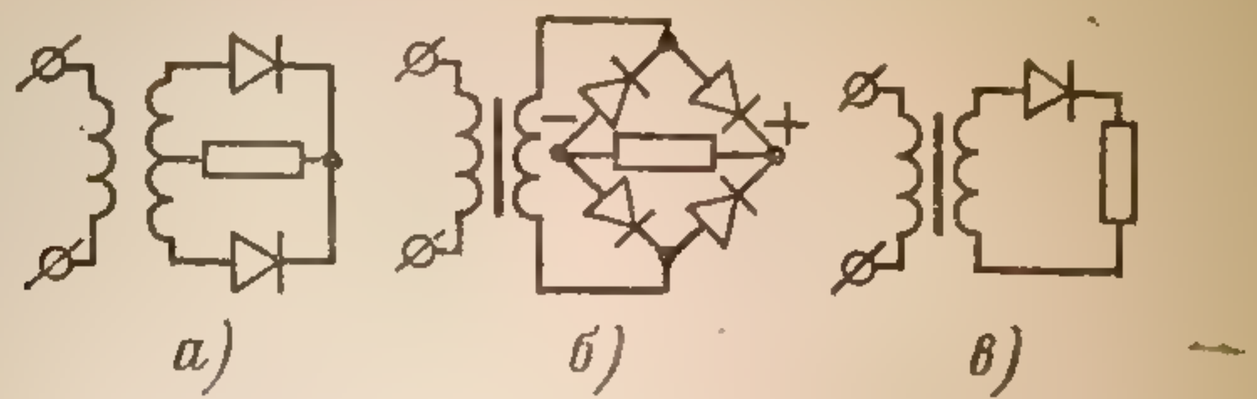


Рис. 12-16. К задачам 12-18, 12-19.

Требуемые отношения (обратные тем, которые определялись в задаче 12-2) будут: $U_{эм}/U_{мэ}=2{,}22$; $I_{эм}/I_{мэ}=1{,}57$.

Обратное максимальное напряжение, приложенное к вентилю, $U_м/n$, где n — число элементов, соединенных последовательно.

Для схемы рис. 12-15 при направлении э. д. с. во вторичной обмотке автотрансформатора от верхнего вывода к подвижному контакту (на рис. 12-15 указано стрелкой) ток пойдет от подвижного контакта к выводу *3*, через выпрямитель к выводу *2* (+) и далее через нагрузочный резистор *r*, амперметр магнитоэлектрической системы, вывод *4* (—), левое плечо выпрямителя, вывод *1*, амперметр электромагнитной системы к обмотке автотрансформатора. При обратном направлении э. д. с. (на схеме указано пунктирной стрелкой) ток пройдет от верхнего вывода автотрансформатора через амперметр электромагнитной системы (в обратном направлении), вывод *1*, плечо выпрямителя, вывод *2* (+), нагрузочный резистор *r*, амперметр магнитоэлектрической системы (в прежнем направлении), вывод *4* (—), правое плечо выпрямителя, вывод *3* к обмотке автотрансформатора. Следовательно, по схеме рис. 12-15 получается двухполупериодное выпрямление и показания приборов будут такими же, как в аналогичной схеме с двухэлектродной лампой (задача 12-2*), т. е. $U_{эм}=0{,}707\,U_м$; $I_{эм}=0{,}707\,I_м$; $U_{мэ}=0{,}637\,U_м$; $I_{мэ}=0{,}637\,I_м$, где $U_м$, $I_м$ — амплитудные значения напряжения и тока. Требуемые отношения (обратные тем, которые определялись в задаче 12-2) будут: $U_{эм}/U_{мэ}=1{,}11$ и $I_{эм}/I_{мэ}=1{,}11$.

Схема выпрямления рис. 12-15 называется мостовой; в упрощенном виде она показана на рис. 12-16, *б*. Пренебрегая падением напряжения в проводящем направлении элемента, легко видеть, что обратное максимальное напряжение $U_{обр.макс}=U_м$, т. е. в 2 раза меньше, чем в схеме трансформатора с нулем.

Вопросы и упражнения к задаче 12-18

1. Среднее значение выпрямленного напряжения, получаемого от однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя, собран-

ного по мостовой схеме, 100 В. Определить в обоих случаях максимальное обратное напряжение, приложенное к вентилю.

2. Средние значения выпрямленных тока и напряжения, которые получаются от выпрямителя, собранного по мостовой схеме, 12 мА и 60 В. Определить действующие значения тока и напряжения во вторичной обмотке трансформатора, присоединенной к выпрямителю.

3. Ток, протекающий через полупроводниковый диод, в проводящем направлении 6 мА, в непроводящем 0,0025 мА. Определить коэффициент выпрямления ($I_{прямой}/I_{обр}$).

4. При каком действующем значении напряжения во вторичной обмотке трансформатора: а) 150 В, б) 200 В, в) 250 В, г) 300 В — выпрямитель, собранный по мостовой схеме, даст среднее выпрямленное напряжение 220, 271, 180 В?

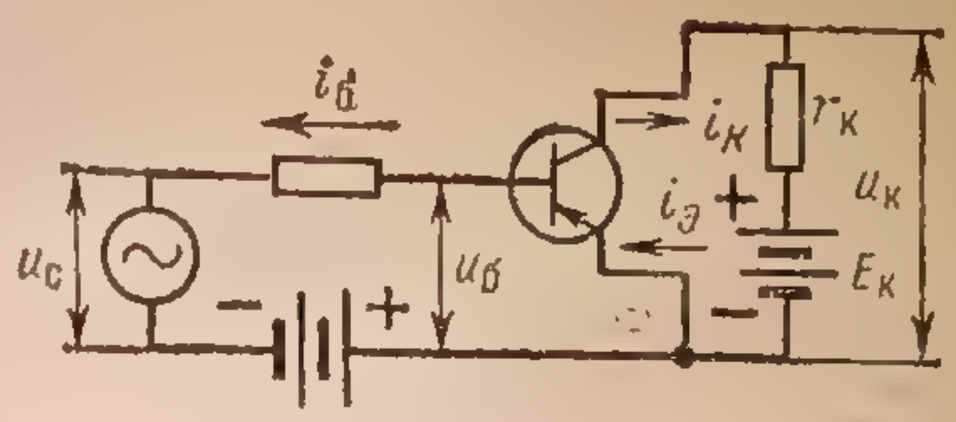


Рис. 12-17. К задаче 12-20.

12-19. Для выпрямления переменного тока в постоянный имеются круглые селеновые элементы диаметром 4 см, которые нужно собрать в выпрямительные столбики. Действующее значение переменного напряжения, допускаемого на один элемент, составляет 15 В, допускаемая плотность тока 40 мА/см^2. Через электроприемники постоянного тока с сопротивлением 50 Ом должен проходить ток 2 А (среднее значение выпрямленного тока). Переменное напряжение в сети 127 В. Определить напряжение вторичной цепи трансформатора, коэффициент трансформации, потребное число последовательно соединенных элементов в плече выпрямителя, число параллельных ветвей в каждом плече, а также общее число элементов. Определить также среднее за период значение тока, проходящего через плечо выпрямителя.

Условие 1. Выпрямление производится по схеме трансформатора с нулем (рис. 12-16, *а*).

Условие 2. Выпрямление производится по мостовой схеме (рис. 12-16, *б*).

Условие 3. Выпрямление по схеме рис. 12-16, *в*.

Условие 4. Для схем двухполупериодного и однополупериодного выпрямлений (рис. 12-16, *б* и *в*) определить действующие значения переменных токов во вторичной и первичной обмотках трансформатора, пренебрегая за малостью током холостого хода его.

12-20. Германиевый транзистор типа П211 используется в качестве усилителя в схеме с общим эмиттером (рис. 12-17). Выходные характеристики транзистора при разных токах базы $I_б$ представлены на рис. 12-18.

Построить динамическую характеристику усилителя при э. д. с. батареи коллектора $E_к = 20$ В, $U_{к0} = 12$ В и $I_{к0} = 70$ мА.

Пользуясь этими характеристиками,

1) построить в функции времени кривые тока коллектора $i_{к.общ}$ и напряжения коллектора $u_{к.общ}$;

2) написать аналитические выражения для тока и напряжения коллектора $i_{к.общ}$, $u_{к.общ}$ при изменении тока базы по закону $i_{б.общ} = (250 + 50 \sin \omega t)$ мкА;

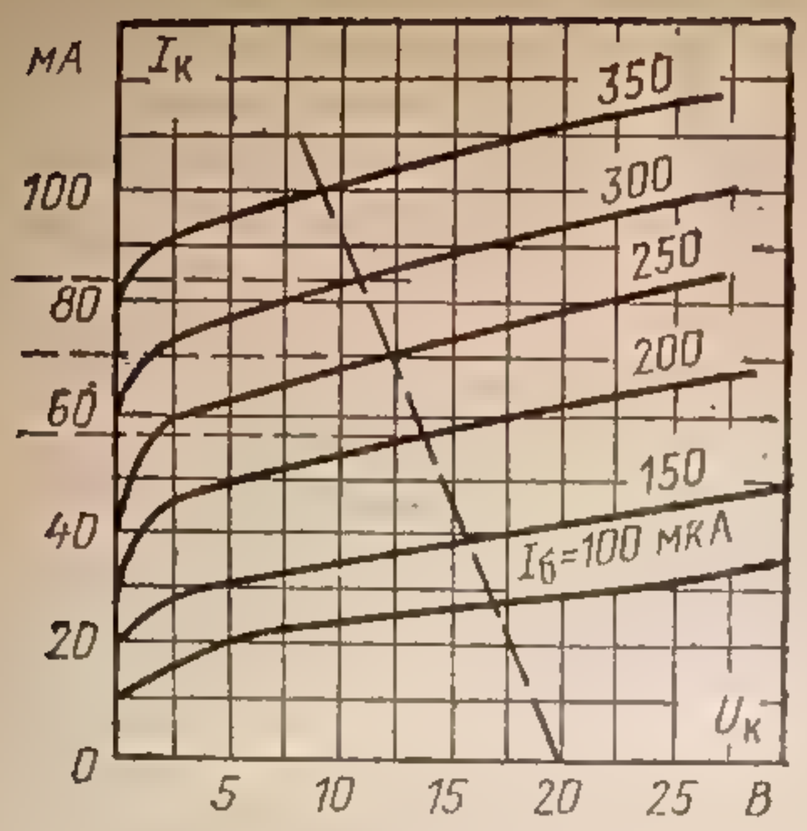


Рис. 12-18. К задаче 12-20.

3) определить действующие значения переменных слагающих тока и напряжения коллектора;

4) определить коэффициент усиления $k_у$ если напряжение сигнала равное напряжению на базе, изменяется по синусоидальному закону $u_с = (0{,}25 \sin \omega t)$ В.

Указание. Транзистор в в схеме усилителя выполняет функции, аналогичные трехэлектродной лампе: коллектор играет роль анода эмиттер — катода, а база роль сетки. Поэтому решение задачи может быть выполнено аналогично решению задачи 12-9.

12-21. Решить предыдущую задачу, если при прочих равных условиях ток базы изменяется по закону $i_{б.общ} = 250 + 100 \sin \omega t$ мкА.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

В данной главе помещены ответы ко всем задачам, вопросам и упражнениям. Ответы к графическим решениям даны лишь для части задач, связанных главным образом с построением векторных диаграмм.

Для задач, данные которых содержат несколько вариантов, ответы, как правило, даны к первому варианту.

1-1. Работа равна 0.

1-2. —

К вопросам и упражнениям 1-1 и 1-2

1. Работа, совершаемая под действием сил электрического поля, считается положительной, работа против сил поля, под действием посторонних сил — отрицательной.

2. Потенциалы точек по направлению линий электрического поля всегда снижаются независимо от того, какой точке мы припишем нулевой потенциал. Действительно, во всех рассмотренных случаях задачи 1-2: $\varphi_A > \varphi_Б$.

3. Под действием сил электрического поля положительные заряды могут перемещаться только от точек с более высоким потенциалом к точкам с низшим потенциалом, т. е. от точки A к $Б$. Отрицательные заряды будут перемещаться в обратном направлении.

4. Значения потенциалов различных точек не являются строго определенными. Они зависят от того, какая точка поля принята за точку нулевого потенциала. Но во всех случаях независимо от положения точки нулевого потенциала напряжение между любой парой

точек в неизменном поле величина постоянная, которая всегда равна разности потенциалов этих точек.

5. 10 В.

6. —3 Дж.

7. —10 В.

8. 6 В, —6 В; — 14 В, +14 В; 14 В, —14 В; —6 В, +6 В.

1-3. $U_{АБ}=30$ В. Для случаев: 1) $\varphi_A=40$ В; $\varphi_Б=10$ В; 2) $\varphi_A=10$ В; $\varphi_Б=-20$ В; 3) $\varphi_A=-10$ В; $\varphi_Б=-40$ В.

1-4. $U_{АБ}=10$ В; $U_{БГ}=20$ В; $U_{БД}=30$ В. При $\varphi_A=0$ имеем $\varphi_Б=-10$ В; $\varphi_В=-20$ В; $\varphi_Г=-30$ В и $\varphi_Д=-40$ В. При $\varphi_Б=0$ имеем $\varphi_A=10$ В; $\varphi_В=-10$ В; $\varphi_Г=-20$ В и $\varphi_Д=-30$ В. При $\varphi_В=0$ имеем $\varphi_A=20$ В; $\varphi_Б=10$ В; $\varphi_Г=-10$ В и $\varphi_Д=-20$ В. При $\varphi_Г=0$ имеем $\varphi_A=30$ В; $\varphi_Б=20$ В; $\varphi_В=10$ В и $\varphi_Д=-10$ В. При $\varphi_Д=0$ имеем $\varphi_A=40$ В; $\varphi_Б=30$ В; $\varphi_В=20$ В и $\varphi_Г=10$ В.

1-5. $F=4$ Н; $\mathscr{E}=200$ В/м. Напряжения и потенциалы такие же, как в задаче 1-4.

К вопросам и упражнениям 1-5

1. При одинаковых напряжениях между смежными точками на линии неоднородного поля расстояния между смежными точками разные, а на линии однородного поля одинаковые.

2. Потенциальная диаграмма остается неизменной вне зависимости от того, какой точке приписывается нулевой потенциал. Изменяется только положение оси абсцисс (линии расстояния), которая смещается и проходит через точку нулевого потенциала.

3. Напряженностью поля и потенциалом относительно произвольно выбранной точки поля, принимаемой за точку нулевого потенциала.

4. 25 В/м.

5. 10 В.

1-6. Ответы сведены в таблицу.

Условие	F, Н	q, Кл	$\mathscr{E}$, В/м	W, Дж	$l_{АБ}$, м	$U_{АБ}$, В	φ_A, В	$\varphi_Б$, В
1	3,2	—	800	—	—	400	—	—300
2	0,6	—	—	0,15	—	500	—	—700
3	—	—	80	—	0,2	16	—	— 16
4	0,2	0,02	10	—	—	—	30	—
5	—	0,08	—	8	20	100	—	—

1-7. Условие 1. $U_{АВ}$ и $\varphi_Б$. Условие 2. F. Условие 3. $\mathscr{E}$, $U_{АБ}$ и $\varphi_Б$. Условие 4. q и φ_A. Условие 5. q, $U_{АБ}$ и W.

1-8. Условие 1. 5000 В/м. Условие 2. 10,5 Н. Условие 3. $2\cdot10^{-5}$ Кл.

1-9. $U_{АБ}=1800$ В; $\mathscr{E}_1=3{,}6\cdot10^4$ В/м; $\mathscr{E}_2=0{,}9\cdot10^4$ В/м; $F_1=5{,}76\times10^4$ Н; $F_2=1{,}44\cdot10^{-4}$ Н.

1-10. $R_2=0{,}5$ м; $U_{АБ}=6250$ В.

1-11. $C=0{,}0172$ мкФ; $\mathscr{E}=554\cdot10^3$ В/м; $d=0{,}09$ мм. Запас прочности изоляции 3,6.

К вопросам и упражнениям 1-11

1. Емкость не изменится, а заряд соответственно: а) увеличится втрое; б) уменьшится в 2 раза.

2. Толщину изоляции нужно увеличить в 2 раза. Заряд и емкость уменьшатся в 2 раза.

3 Площадь обкладок нужно увеличить в 2 раза. Напряжение нужно будет уменьшить в 2 раза, а емкость увеличится в 2 раза.

1-12. 260 В.

1-13. $0{,}48 \cdot 10^{-3}$ Кл.

1-14. 0,25 мкФ.

1-15. а) $3{,}68 \cdot 10^{-4}$ мкФ; б) $19{,}2 \cdot 10^{-4}$ мкФ, т. е. увеличится в 5,2 раза (ε для миканита 5,2).

1-16. 0,19 м² при $\varepsilon = 6$ (таблица приложения 2).

1-17. 15 кВ и 60 кВ при электрической прочности воздуха 3×10^6 В/м, трансформаторного масла $12 \cdot 10^6$ В/м.

1-18. $12 \cdot 10^6$ В/м.

1-19. $U_1 = 750$ В; $U_2 = 250$ В; $U = 1000$ В; $C_{экв} = 3$ мкФ; $d_2 = 1$ мм; $d_{экв} = 4$ мм.

1-20. $Q_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ Кл; $Q_2 = 12 \cdot 10^{-3}$ Кл; $Q = 16 \cdot 10^{-3}$ Кл; $C_{экв} = 16$ мкФ; $S_2 = 300$ см²; $S_{экв} = 400$ см².

К вопросам и упражнениям 1-19 и 1-20

1. Нужно в 2 раза увеличить расстояние между обкладками или в 2 раза уменьшить площадь пластин.

2. Нужно в 2 раза уменьшить расстояние между обкладками или в 2 раза увеличить площадь пластин.

3. 2 и 50 мкФ.

4. а) 3 мкФ; б) 6 мкФ; в) 12 мкФ; г) 18 мкФ; д) 4 мкФ; е) 4,5 мкФ.

1-21. $0{,}16 \cdot 10^{-3}$ мкФ.

1-22. 6 и 4 мкФ.

1-23. $C_{экв} = 25$ мкФ; $Q = 0{,}025$ Кл; $U_1 = 125$ В; $U_2 = 625$ В; $U_3 = 250$ В.

1-24. При всех вставленных штырях $C_{экв} = 9$ мкФ. После удаления штыря *1* — 7,2 мкФ, штыря *2* — 4,5 мкФ, штыря *3* — 4 мкФ и, наконец, штыря *4* — 3 мкФ.

1-25. 750 В. Энергия электрического поля остается неизменной.

1-26. Во всех случаях замкнуты штыри *5* и *6*. После отключения батареи от сети: при выключенных штырях *1, 2, 3, 4* $U = 240$ В; $Q = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$ Кл; $W_{эл.поля} = 115{,}2 \cdot 10^{-3}$ Дж. При включении штыря *1* $U = 160$ В; $Q = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$ Кл; $W_{эл.поля} = 76{,}8 \cdot 10^{-3}$ Дж. При включении штырей *2* и *3* $U = 80$ В; $Q = 0{,}96 \cdot 10^{-3}$ Кл, $W_{эл.поля} = 38{,}4 \cdot 10^{-3}$ Дж. При включении последнего штыря *4* вся батарея разрядится.

1-27. $U_1 = 1100$ В; $U_2 = 220$ В; $W_1 = 0\,242$ Дж и $W_2 = 0{,}0484$ Дж. Одинаковый заряд на обкладках конденсаторов получится при последовательном соединении их. Исходя из этого, $C_{экв} = 0{,}333$ мкФ; $U = 1320$ В; $W = 0{,}29$ Дж.

1-28. $U_1 = 900$ В; $U_2 = 600$ В; $\mathscr{E}_1 = 0{,}5 \cdot 10^6$ В/м; $\mathscr{E}_2 = 3 \cdot 10^6$ В/м. Электрическая прочность изоляционных слоев приведена в таблице приложения 2. Слой электроизоляционного картона выдержит приходящееся на него напряжение, а воздушный слой может начать пробиваться.

Выводы. Чем тоньше слой воздуха, тем большая напряженность поля в нем возникает. Пробой воздушного слоя вызовет искрение и резкое повышение температуры изоляции. Через некоторое время может оказаться пробитым и электроизоляционный картон. Следовательно, изоляция (например, проводов и кабелей) должна прилегать к металлическим частям как можно плотнее, чтобы не образовывались воздушные прослойки, в которых смогут создаваться опасные для изоляции напряженности электрического поля.

2-1. Условие 1. $E=U=5$ В; $I=0$. Условие 2. $E=5$ В; $I=2$ А; $\delta=10$ А/мм^2; $U=4{,}5$ В; $U_0=0{,}5$ В; $W_{F_0}=100$ Дж; $W_{F_{эл}}=90$ Дж; $W_0=10$ Дж. Уравнение энергетического баланса: $W_{F_0}=W_{F_{эл}}+W_0$; $P_{ист}=10$ Вт, $P=9$ Вт, $P_0=1$ Вт. Уравнение баланса мощностей $P_{ист}=P+P_0$; $\eta=0{,}9$.

К вопросам и упражнениям 2-1

1. Электродвижущая сила направлена от минуса к плюсу, внутри источника, т. е. в сторону накопления положительных зарядов, как показано на рис. 2-3, *а* и *б*.

2. Во внешней цепи — электрическими силами, внутри источника — сторонними силами, разделяющими заряды.

3. В замкнутой цепи 36 В, в разомкнутой цепи 40 В.

4. 1 кВт·ч.

5. $36\cdot10^5$; $36\cdot10^3$; 3600 Дж.

6. 1 Дж$=0{,}278\cdot10^{-3}$ Вт·ч$=0{,}278\cdot10^{-5}$ гВт·ч$=0{,}278\cdot10^{-6}$ кВт·ч; 1 кДж$=0{,}278$ Вт·ч$=0{,}278\cdot10^{-2}$ гВт·ч$=0{,}278\cdot10^{-3}$ кВт·ч.

2-2. Условие 1. $E=12$ В; $P_1=36$ Вт; $P=30$ Вт; $P_0=6$ Вт; $\eta=83{,}4\%$. Условие 2. $U_{0\%}=16{,}7$; $W_1=0{,}12$ гВт·ч; $W_2=0{,}1$ гВт·ч; $W_0=0{,}02$ гВт·ч.

2-3. 2,5 А; 21,12 В; 60 Вт; 12%; $\eta=88\%$.

2-4. Ответы сведены в следующую таблицу.

Время t, с	Ток I, А	Плотность тока δ, А/мм^2	Сопротивление r, Ом	Длина провода l, м	Расход энергии W, кВт·ч	Мощность p, кВт	Стоимость, коп.
5	27,2	109	8,1	2.07	0,5	6	2
10	13,6	54,5	16,2	4,14	0,5	3	2
20	6,8	27,2	32,4	8,28	0,5	1,5	2
30	4,5	18	49	12,5	0,5	1	2

К вопросам и упражнениям 2-4

1. По сравнению с ответами для задачи 2-4, сведенными в таблицу, ответы на вопрос 1 к данной задаче изменятся соответствующим образом: сопротивление и длина провода уменьшатся в 4 раза, ток увеличится в 2 раза, все остальные величины останутся без изменения.

2. Ток уменьшится в 2 раза, время нагрева увеличится в 4 раза, мощность уменьшится в 4 раза, потребное количество энергии останется неизменным.

3. 25 Ом.

4. 25 Дж/с (Вт).

5. а) 2500 Вт.

2-5. Алюминий.

2-6. 9,8 м.

2-7. 79 м.

2-8. $S_м = 10$ мм²; $S_{ал} = 16{,}35$ мм²; $m_м = 17{,}8$ кг; $m_{ал} = 8{,}8$ кг.

2-9. 0,0463 Ом.

2-10. Сопротивление катушки из медного провода 11,2 Ом, из константана 318 Ом; из нихрома 630 Ом.

2-11. $\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$. Для частных случаев:

1) приблизительно 1 : 5; 2) 1 : 7; 3) и 4) приблизительно 1 : 3.

2-12. $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. Для частных случаев:

1) 24; 2) 43; 3) 7,5; 4) 8. Значения удельных сопротивлений ρ даны в таблице приложения 3.

2-13. $\eta = 77\%$; $r = 20$ Ом при $U = 120$ В. $\eta = 42\%$; $r = 36{,}6$ Ом при $U = 220$ В.

2-14. 30 В; 10 А.

2-15. 710 кДж; 160 Ом.

2-16. Для медных изолированных проводов сечением 2,5 мм², проложенных открыто, $\delta_{доп} = 11$ А/мм², $I_{доп} = 27{,}4$ А.

Для медных изолированных проводов сечением 10 мм², проложенных открыто, $\delta_{доп} = 7{,}6$ А/мм², $I_{доп} = 76$ А.

Требуемое по условиям нагрева сечение проводов 0,5 мм². Из имеющихся на складе выбираем провода сечением 2,5 мм². Номинальный ток плавкой вставки 15 А.

Установившаяся температура нагрева константанового провода $\Theta_{нагрева} = 480$ °С.

К вопросам и упражнениям 2-16

1. а) При одинаковом токе в проводах в стальном проводе выделится теплоты больше, чем в медном, в 7,4 раза.

б) При одинаковом токе в проводах в 8 раз больше теплоты выделится в проводе меньшего диаметра.

в) Допустимая по условиям нагрева проводов плотность тока, а следовательно, и допустимый ток не зависят от длины провода.

При выводе уравнения теплового баланса (1) длина l входила в обе части уравнения, после чего было произведено сокращение на l. Это значит, что с увеличением длины пропорционально возрастает количество выделяемого и рассеиваемого тепла. При заданной допустимой температуре нагрева все остальные величины, входящие в уравнение теплового баланса, в том числе плотность тока и ток, останутся неизменными.

г) Допустимый ток нужно увеличить в 2,82 раза.

д) Нужно взять провод, диаметр которого в 1,585 раза больше.

е) Допустимая плотность тока уменьшается, а допустимый ток увеличивается. Это непосредственно следует из уравнения теплового

баланса (1), в котором правая часть равенства должна оставаться постоянной. $\Theta_{уст}$ выражает установившуюся разность температур провода и окружающей среды, причем установившаяся температура провода должна быть равна допустимой. Следовательно, левая часть равенства независимо от диаметра провода также должна оставаться постоянной, и поэтому с увеличением диаметра провода допустимая плотность тока уменьшится: $\delta^2 d/\gamma = \text{const}$. Уменьшение плотности тока происходит в отношении $\sqrt{d}$, в то время как сечение провода увеличивается пропорционально d^2. Поэтому допустимый ток, равный произведению допустимой плотности тока на сечение провода, с увеличением диаметра провода увеличивается.

2. Для медного провода 0,4%, для константанового провода 0,004%.

3. 16 и 0,16%.

4. Уменьшится в 4 раза.

5. При уменьшении нормы потери напряжения 1 мм²; при увеличении нормы потери напряжения 0,25 мм².

6. Номинальное напряжение нужно увеличить при неизменной мощности в $\sqrt{2}$ раз, при неизменном токе в 2 раза.

7. $S_м/S = \gamma/\gamma_м$. а) При замене медных проводов алюминиевыми $S_{ал} = S_м\gamma_м/\gamma_{ал} = S_м \cdot 57/35 = S_м \cdot 1{,}63$.

б) При замене медных проводов стальными

$$S_{ст} = S_м \cdot 57/7{,}7 = S_м \cdot 7{,}4.$$

8. г) 50 Вт.

2-17. 0,563 Ом; 0,652 Ом.

2-18. 3,04 Ом при 30°С; 2,7 Ом при 0°С; 2,46 Ом при —20°С.

2-19. Около 2°С и 1670°С.

2-20. 1,01 Ом; 0° С = 273 К.

2-21. 53,4°С.

2-22. Абсолютные изменения сопротивлений $\Delta r_м = 0{,}056$ Ом; $\Delta r_к = 0{,}377$ Ом. Относительные изменения сопротивлений, выраженные в процентах первоначального,

$$\frac{\Delta r_м}{r_{1м}} \cdot 100 = 14\%; \quad \frac{\Delta r_к}{r_{1к}} \cdot 100 = 1{,}56\%.$$

Сопротивления медного и константанового провода в нагретом состоянии $r_{2м} = 0{,}456$ Ом; $r_{2к} = 24{,}58$ Ом.

Относительное изменение сопротивления медных проводов при нагревании их до 55° С в 9 раза больше, чем относительное изменение сопротивления константановой проволоки электрической печи при нагревании ее до 420° С.

2-23. $I = 7{,}8$ А для провода сечением 0,5 мм²; $I = 10{,}4$ А для провода сечением 0,75 мм².

2-24. $I_{доп.ал} = 102$ А; $I_{пл.вст.медн} = 125$ А; $I_{пл.вст.ал} = 100$ А.

2-25. Токи ответвлений $I_1 = 13{,}7$ А; $I_2 = 22{,}7$ А; $I_3 = 18{,}3$ А. Ток питающей линии $I = I_1 + I_2 + I_3 = 54{,}7$ А.

Сечение проводов: питающей линии $S = 10$ мм² ($I_{доп} = 80$ А); ответвлений $S_1 = 0{,}75$ мм² ($I_{доп} = 15$ А), $S_2 = 2{,}5$ мм² ($I_{доп} = 30$ А), $S_3 = 1{,}5$ мм² ($I_{доп} = 23$ А).

Номинальные токи плавких вставок: для питающей линии $I_{пл.вот} = 60$ А; для ответвлений $I_{пл.вст1} = 15$ А, $I_{пл.вст2} = 25$ А, $I_{пл.вст3} = 20$ А.

Во избежание отключения цепи при нормальном режиме работы во всех случаях номинальные токи плавких предохранителей должны быть больше соответствующих рабочих токов, что и выполнено. Соблюдается также и селективность защиты: при перегрузках отключаются сначала соответствующие ответвления и в последнюю очередь питающая линия, когда ток в ней превысит 60 А.

2-26. При напряжении 220 В, 60 Вт и 6,4 м.

При напряжении 127 В, 34,6 Вт и 3,7 м.

2-27. По расчету для медного провода $S_р=4{,}3$ мм² с учетом нагрева выбираем провод сечением $S=6$ мм², $\Delta U=8$ В; $\Delta U_{\%}=3{,}7\%$, $\Delta P_{\%}=3{,}7\%$.

По расчету для алюминиевого провода $S_р=7$ мм². С учетом нагрева выбираем провод сечением $S=10$ мм²; $\Delta U=7{,}8$ В; $\Delta U_{\%}=\Delta P_{\%}=3{,}7\%$.

2-28. Расчетное сечение 225 мм². Выбираем провод сечением 240 мм² (приложение 5). Данное сечение удовлетворяет по условиям нагрева.

2-29. $S=16$ мм²; $U_1=522$ В; $\Delta P\%=4{,}4\%$; $\eta=0{,}96$.

2-30. $I_{1к.з}=240$ А; $I_{2к.з}=12$ А. При токе в цепи 8 А $U_{01\%}=3{,}33\%$; $U_{02\%}=66{,}6\%$; $r_1=14{,}5$ Ом; $r_2=5$ Ом. Баланс мощностей $P_1=P_{01}+P_2$, или $960=32+928$ Вт при $r_{01}=0{,}5$ Ом и $960=640+320$ Вт при $r_{02}=10$ Ом, $\eta_1=96{,}7\%$, $\eta_2=33{,}4\%$.

К вопросам и упражнениям 2-30

1. При холостом ходе $r=\infty$ при коротком замыкании $r=0$.
2. Напряжение будет увеличиваться от 0 до 50 В.
3. Ток будет уменьшаться от 500 А до 0 при $r_{01}=0{,}2$ Ом и от 10 мА до 0 при $r_{02}=10$ кОм.
4. Мощность будет уменьшаться от 25 кВт до 0.

2-31. 10 А; 120 В; $I_{к.з}=1200$ А; $U_{к.з}=0$.

2-32. 0,9 Ом.

2-33. $U=10$ В; $I=2$ А; $r=1$ Ом. Мощность источника э. д. с. $P_1=24$ Вт; мощность, передаваемая во внешнюю цепь, $P_2=20$ Вт; мощность потерь энергии внутри источника $P_0=4$ Вт. Баланс мощностей $P_1=P_2+P_0$.

2-35. 4,92 Ом; 118 В; $P_1=P_2+P_0$, или $3120=2832+288$ Вт.

2-36. $U=95$ В; $E=98$ В.

2-37. Условие 1. 4000 Дж/с; стоимость энергии 64 коп. Условие 2. 3,2 коп. Условие 3. 88,4 кВт; 384 А.

2-38. Условие 1. $I=20$ А; $U_1=230$ В; $U_2=200$ В; $\Delta U=30$ В; $l_x=57$ м.

Условие 2. $\frac{U_A}{U_н}\cdot 100=0{,}2\%$; $\frac{I_B}{I}\cdot 100=0{,}11\%$; $U_{2м}=0{,}176$ В.

2-39. $r_р=50$ Ом; $r=9{,}6$ Ом; $r_0=0{,}4$ Ом; $E=100$ В.

При полностью введенном реостате $U_{сети}=99$ В; $U_р=83$ В; $U=16$ В.

К вопросам и упражнениям 2-38 и 2-39

1. При коротком замыкании на выводах электроприемника $I=120$ А; $U_1=180$ В; $U_2=0$; $\Delta U=180$ В.

При отключенном электроприемнике $I=0$; $U_1=240$ В; $U_2=240$ В; $\Delta U=0$.

2. При включенном рубильнике и присоединении амперметра к выводам участка 2 $I=1{,}8$ А.

При отключенном рубильнике и присоединении амперметра к водам участка 4 $I=1$ А.

3. При включенном рубильнике и присоединении вольтметра к выводам участка 2 $U=40$ В.

При отключенном рубильнике и присоединении вольтметра к водам участка 4 $U=90$ В.

4. $U_1=22$ В; $U_2=33$ В; $U_3=55$ В, $I=2$ А.

5. $r_1=3$ Ом; $r_2=12$ Ом; $r_3=15$ Ом.

6. При $\varphi_Г=-60$ В заземлить нужно точку A, при $\varphi_Г=-20$ В точку B и при $\varphi_Г=-40$ В точку $Б$.

7. Наибольшее показание даст вольтметр 3, наименьшее — вольтметр 4.

2-40. 0,0992 А; 119 В.

2-41. 5,97 А. Практически ток остается без изменения.

2-42. 2,5 км.

2-43 1,1 А.

2-44. $U_1=50$ В; $U_3=40$ В; $U=110$ В; $P_1=250$ Вт; $P_2=100$ Вт; $P_3=200$ Вт; $P=550$ Вт; $P=P_1+P_2+P_3$.

2-45. Если $\varphi_A=0$, то $\varphi_Б=-50$ В, $\varphi_B=-70$ В, $\varphi_Г=-100$ В. Если $\varphi_Б=0$, то $\varphi_A=50$ В, $\varphi_Б=-20$ В, $\varphi_Г=-60$ В и т д.

Замечание. В зависимости от того, какой точке приписан нулевой потенциал, изменяются потенциалы отдельных точек, но разность потенциалов между любой парой точек остается неизменной.

2-46. $U_1=24$ В; $U_2=36$ В; $U_3=60$ В; $U=120$ В.

2-47. $I=3$ А; $r_2=8$ Ом; $r_3=22$ Ом.

2-48. $r_р=60$ Ом; $U_р=120$ В.

2-49. $r=20$ Ом. Пределы изменения напряжения на выводах постоянного сопротивления от 12 до 60 В.

2-50. При полностью введенном реостате $I=1{,}75$ А; $U=45{,}5$ В; при выведенном реостате $I=4{,}72$ А; $U=123$ В.

2-51. При $U=60$ В и неравных сопротивлениях участков $I_1=3$ А; $I_2=1{,}2$ А; $I_3=1{,}8$ А; $I_4=0{,}3$ А; $I_5=1{,}2$ А; $I_6=1{,}5$ А; $U_{АБ}=4{,}8$ В; $U_{БВ}=43{,}2$ В; $U_{ВГ}=12$ В.

При $U=198$ В и равных сопротивлениях $I_1=9$ А; $I_2=I_3=4{,}5$ А; $I_4=I_5=I_6=3$ А; $U_{АБ}=108$ В; $U_{БВ}=54$ В, $U_{ВГ}=36$ В.

К вопросам и упражнениям 2-51

1. 2,4 Ом.

2. 101 Ом.

3. $I_1=4$ А; $I_2=6$ А; $U=96$ В.

4. Эквивалентное сопротивление уменьшится в 3 раза, ток увеличится в 3 раза.

5. а) $3r$; б) $r/3$; в) r.

6. 110 В.

7. Амперметр, обозначенный буквой *в*.

8. Амперметр, обозначенный буквой *в*, покажет 6 А, амперметры *а* и *б* покажут 4 А, амперметр *г* покажет 2 А Ток в неразветвленной части цепи равен 8 А, но амперметра, измеряющего этот ток, на схеме нет.

2-52. 34,2 А; 232 В.

2-53. $r_1=60$ Ом; $I_1=1$ А; $r_2=120$ Ом; $I_2=0{,}5$ А.

2-54. $r_{общ}=50$ Ом; $r_л=150$ Ом; $I_л=0{,}8$ А.

2-55. 1) $2r$; 2) r; 3) $2r/3$; 4) $r/3$; 5) $4r/3$.

2-56. $I=4$ А; $I_1=1{,}6$ А; $I_2=2{,}4$ А; $U=96$ В; $P_{ист}=400$ Вт; $P_0=16$ Вт; $P_1=153{,}6$ Вт; $P_2=230{,}4$ Вт; $P_{ист}=P_0+P_1+P_2$.

2-57. $r_1=8$ Ом; $r_2=4$ Ом.

2-58. $r_1=15$ Ом; $r_2=10$ Ом; $r_0=2{,}94$ Ом; $E=44{,}7$ В.

2-59. $U_1=215$ В; $U_2=201$ В; $P_1=6{,}45$ кВт; $P_2=4{,}02$ кВт; $\Delta U=\Delta U_1+\Delta U_2=15+14=29$ В; $\Delta P=\Delta P_1+\Delta P_2=750+280=1\,030$ Вт.

2-60. При установке движка в точке *А* $I=0$; $U=0$. При установке движка в точке *Б* $I=0{,}0545$ А; $U=54{,}5$ В. При установке движка в точке *В* $I=0{,}104$ А; $U=104$ В. При установке движка в точке *Г* $I=0{,}5$ А; $U=250$ В.

2-61. При $r_0=4$ Ом; $E=20$ В; $U=16$ В; $I_0=4$ А. При $r_6=0$; $U=15{,}3$ В; $I_0=4{,}7$ А. При $r_6=\infty$; $U=17{,}3$ В; $I_0=2{,}7$ А.

2-62. 1 А.

2-63. 380 В.

2-64. $U=67$ В; $I_1=I_{11}=3{,}4$ А; $I_2=I_3=0{,}2$ А; $I_4=1{,}2$ А; $I_5=I_6=1{,}4$ А; $I_7=1$ А; $I_8=I_9=0{,}4$ А; $I_{10}=2$ А.

2-65. $I_1=I_{11}=2$ А; $U_1=U_{11}=2{,}5$ В; $I_2=I_3=0{,}6$ А; $U_2=0{,}6$ В; $U_3=2{,}4$ В; $I_4=0{,}15$ А; $U_4=3$ В; $I_5=I_6=0{,}75$ А; $U_5=7{,}5$ В; $U_6=4{,}5$ В; $I_7=0{,}25$ А; $U_7=10$ В; $I_8=I_9=0{,}5$ А; $U_8=7$ В; $U_9=3$ В; $I_{10}=1{,}25$ А; $U_{10}=25$ В.

2-66. Для цепи рис. 2-28, *а* $I=20$ А; $U_1=50$ В; $U_2=30$ В; $U=80$ В; $P_1=1200$ Вт; $P_2=800$ Вт; $P_{01}=200$ Вт; $P_{02}=200$ Вт; $P=1600$ Вт. Оба источника работают в режиме генератора. $P_1+P_2=P_{01}+P_{02}+P$.

Для цепи рис. 2-28, *б* $I=4$ А; $U_1=58$ В; $U_2=42$ В; $U=16$ В; $P_1=240$ Вт; $P_2=160$ Вт; $P_{01}=8$ Вт; $P_{02}=8$ Вт; $P=64$ Вт. В режиме генератора работает один первый источник, второй работает в режиме потребителя. $P_1=P_2+P_{02}+P_{01}+P$.

2-67. Условие 1. $I_1=36$ А; $I_2=24$ А; $I=60$ А; направления токов показаны на рис. 2-30; $U=120$ В; $P_1=4968$ Вт; $P_2=2995{,}2$ Вт; $P_{01}=648$ Вт; $P_{02}=115{,}2$ Вт; $P=7200$ Вт. Оба источника работают в режиме генератора, поэтому $P_1+P_2=P_{01}+P_{02}+P$.

Условие 2. Ответы сведены в следующую таблицу.

Данные	I_1, А	I_2, А	I, А	U_1, В	E_1, В	E_2, В
а) $I_1=I_2$	30	30	60	120	135	126
б) $I_1:I_2=1:2$	20	40	60	120	130	128
в) $I_1:I_2=1:5$	10	50	60	120	125	130
г) $I_1=0$	0	60	60	120	120	132
д) $I_2=0$	60	0	60	120	150	120

Условие 3. $E_2=100{,}8$ В; $I_1=68$ А; $I=52$ А; $U=104$ В.

К вопросам и упражнениям 2-66, 2-67

1. Признаком работы источника э. д. с. в режиме генератора является совпадение направлений тока и э. д. с. Напряжение на выводах источника $U=E-Ir_0$.

2. Признаком работы источника э. д. с. в режиме электроприемника является встречное направление тока и э. д. с.

Напряжение на выводах источника $U=E+I\cdot r_0$.

3. $I=3$ А; $U_1=97$ В; $U_2=38$ В; $U=135$ В. Аккумуляторная батарея разряжается, т. е. работает в генераторном режиме.

4. $I=1$ А; $U_1=99$ В; $U_2=54$ В; $U=45$ В. Аккумуляторная батарея заряжается, т. е. работает в режиме электроприемника (потребителя).

5. 1.

6. 1,5 В; 16 и 4 А.

7. Две параллельные группы аккумуляторов по три последовательно соединенных аккумулятора в каждой группе. Всего шесть аккумуляторов.

8. Аккумуляторы заряжаются. $U=110$ В; $E_1=120$ В; $I=15$ А; $r=7{,}34$ Ом

9. а) Батарея заряжается. Направления токов на схеме рис. 2-31 указаны правильно.

б) Холостой ход.

в) Короткое замыкание. Направление тока I_2 на схеме рис. 2-31 нужно изменить на обратное.

г) Батарея разряжается. Направление тока I_2 на схеме рис. 2-31 нужно изменить на обратное.

2-68. Для цепи рис. 2-28, *а*: $I=6$ А; $U_1=98{,}8$ В; $U_2=45{,}2$ В; $U=144$ В; $P_1=600$ Вт; $P_2=300$ Вт; $P=864$ Вт; $P_{01}=7{,}2$ Вт; $P_{02}=28{,}8$ Вт; уравнение баланса мощностей $P_1+P_2=P_{01}+P_{02}+P$. Аккумуляторная батарея разряжается, т. е. работает в генераторном режиме.

Для цепи рис. 2-28, *б*: $I=2$ А; $U_1=99{,}6$ В; $U_2=51{,}6$ В; $U=48$ В; $P_1=200$ Вт; $P_2=100$ Вт; $P=96$ Вт; $P_{01}=0{,}8$ Вт; $P_{02}=3{,}2$ Вт; уравнение баланса мощностей $P_1=P_2+P_{02}+P_{01}+P$. Аккумуляторная батарея заряжается, т. е. работает в режиме электроприемника.

2-69. 2 и 1,455 А.

2-70. Число параллельных групп 10. Число аккумуляторов в группе 6 и общее число аккумуляторов 60.

2-71. 200 А.

2-72. При $U=120$ В $I_1=20$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_1); $I_2=8$ А (направлен против э. д. с. E_2); $I=12$ А; $r=10$ Ом.

При $U=118$ В $I_1=24$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_1); $I_2=0$; $I=24$ А, $r=4{,}93$ Ом.

При $U=116$ В $I_1=28$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_1); $I_2=8$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_2); $I=36$ А; $r=3{,}23$ Ом.

При $U=0$ $I_1=260$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_1); $I_2=472$ А (совпадает по направлению с э. д. с. E_2); $I=732$ А; $r=0$.

2-73. Условие 1. а) Нагрузка распределяется между генератором и батареей поровну; $I_1=I_2=5$ А; $E_1=51$ В; $U=49$ В; $P_1+P_2=P_{01}+P_{02}+P$; $255+250=10+5+490$ Вт.

б) Нагрузка распределяется в отношении 3 : 2; $I_1=6$ А; $I_2=4$ А; $E_1=51{,}6$ В; $U=49{,}2$ В; $P_1+P_2=P_{01}+P_{02}+P$; $309{,}6+200=14{,}4+3{,}2+492$ Вт.

в) $I_2=0$; $I_1=10$ А; $E_1=54$ В; $U=50$ В; $P_1=P_{01}+P$; $540=40+500$.

Условие 2. $I_1=20$ А; $I_2=-10$ А; $U=52$ В; $P_1=1200$ Вт; $P_2=500$ Вт; $P_{01}=160$ Вт; $P_{02}=20$ Вт; $P=520$ Вт.

Ток I_1 совпадает по направлению с э. д. с. E_1, т. е. источник работает как генератор. Ток I_2 направлен против э. д. с. аккумуляторной батареи E_2, т. е. последняя заряжается, работая в режиме потребителя. Уравнение баланса мощностей $P_1=P_2+P_{02}+P_{01}+P$.

2-74. Условие 1. При включенном рубильнике $I_1=50$ А (совпадает с направлением э. д. с.); $I_2=10$ А (совпадает с направлением э. д. с.); $I=60$ А; $U=120$ В.

При отключенном рубильнике $I_1=7{,}15$ А (совпадает с направлением э. д. с.); $I_2=7{,}15$ А (направлен против э. д. с. второго источника); $U=128{,}57$ В; $I=0$.

При коротком замыкании выводов электроприемника $I_1=650$ А (совпадает с направлением э. д. с.); $I_2=250$ А (совпадает с направлением э. д. с.); $I=900$ А; $U=0$.

Условие 2. Ответы сведены в следующую таблицу.

Условие	E_2, В	I_1, А	I_2, А	I, А	U, В
$I_1=I_2$	139,5	31	31	62	124
$I_1=2I_2$	131,95	40,6	20,3	60,9	121,8
$I_1=0$	162,5	0	65	65	130
$I_2=0$	118,4	59,2	0	59,2	118,4
$I_2=-20$А	104,8	77,4	—20	57,4	114,8

2-75. Ответы сведены в следующую таблицу.

Условие	E_1, В	E_2, В	I_1, А	I_2 А
$I_1=I_2$	102	120	30	30
$I_1=2I_2$	104	112	40	20
$I_1=0$	96	144	0	60
$I_2=0$	108	96	60	0
$I_2=-20$А	112	80	80	—20

2-76. Для сопротивлений групп ламп $r_1=5$ Ом и $r_2=5$ Ом нулевой провод не имеет значения, так как $I_0=0$; $U_1=U_2=216$ В; $I_A=I_Б=43{,}3$ А.

Для сопротивлений групп ламп $r_1=5$ Ом и $r_2=10$ Ом при наличии нулевого провода $I_A=43{,}3$ А; $I_Б=21{,}8$ А; $I_0=21{,}5$ А; $U_1=216$ В; $U_2=218$ В.

При обрыве нулевого провода $I_A=I_Б=29{,}0$ А; $U_1=145$ В; $U_2=290$ В.

Для сопротивлений групп ламп $r_1=5$ Ом; $r_2=\infty$ при наличии нулевого провода $I_A=43{,}3$ А; $I_Б=0$; $I_0=43{,}3$ А; $U_1=216$ В; $U_2=220$ В.

При обрыве нулевого провода $I_A=I_Б=0$; $U_1=0$; $U_2=440$ В.

2-77. $I_1=2$ А; $I_2=-2$ А (направлен против э. д. с. E_2); $I_3=0$.

2-78. Условие 1. Ток на участке с сопротивлением r_5 в амперах: 6,35; 3; 1,57; 1,3; 1,02.

Условие 2. $I_5=0$.

К вопросам и упражнениям 2-78

1. Задавшись произвольно направлениями токов, как показано, например, на схеме рис. 2-36, можно составить по первому закону Кирхгофа независимых уравнений на одно меньше, чем число узлов. В заданной цепи четыре узла. Следовательно, независимых уравнений будет три. Для узла A: 1) $I=I_1+I_3$; для узла $Б$: 2) $I_1=I_2+I_5$; для узла B: 3) $I_2+I_4=I$. Уравнение, составленное для узла $Г$, будет следствием остальных. Недостающие уравнения составляются по

второму закону Кирхгофа. Например, для контура *АБВГ*: 4) $E=I_1r_1+I_2r_2$; для контура *АГВА*: 5) $E=I_3r_3+I_4r_4$; для контура *АБГА*: 6) $0=I_1r_1+I_5r_5-I_3r_3$. Дополнительное уравнение, составленное для контура *БВГБ*, будет являться следствием предыдущих уравнений, так как содержит все те же элементы, которые входили в уравнения (4), (5) и (6).

2. 200 Ом.

3. $E_{экв}=20$ В; $r_{экв}=24$ Ом.

4. $E_{экв}=30$ В; $r_{экв}=24$ Ом.

2-79. Ток I_5 направлен от точки *Г* к *Б* и равен 0,2 А.

2-80. $r_x=120$; 88; 40; 24; 16; 8 и 1,6 Ом.

2-81. $I_5=22{,}5$ А; $U_5=30$ В.

2-82. $I_5=7{,}5$ А; $U_5=10$ В.

2-83. Условие 1. 0,15 А и 2,25 В.

Условие 2. 0 (нуль).

3-1. 1350 Н.

3-2. $U=21$ В; $B=188{,}8$ Т; $H=15\,000$ А/м; $\Phi=4720\cdot10^{-8}$ Вб; $L=1{,}4$ мГ.

К вопросам и упражнениям 3-1, 3-2

1. 1 Т = 10 000 Гс.

2. 2 Т = 20 000 Гс.

3. 12 Н.

4. По расчету 1 А. Данные, приведенные в условии задачи, соответствуют определению единицы тока в системе СИ.

5. а) 40 000 А/м; б) 0,05 Т; в) 10^{-4} Вб; г) 1000; д) 0,01 Г.

3-3. 20 Н.

3-4. 2,5 Н. При увеличении тока в 4 раза сила увеличится в 16 раз. Действующие силы взаимного отталкивания между жилами кабеля передаются через бумажную изоляцию свинцовой оболочке и создают в ней напряжения на разрыв.

3-5. $B_A=0{,}05\cdot10^{-3}$ Т; $F_A=5$ Н/км; $B_Б=0{,}086\cdot10^{-3}$ Т; $F_Б=4{,}32$ Н/км; $B_B=0{,}086\cdot10^{-3}$ Т; $F_B=4{,}32$ Н/км.

Соответствующие построения векторов магнитных индукций и электромагнитных сил выполнены на рис. 13-1.

3-6. $\Phi=0{,}224\cdot10^{-4}$ Вб; $L=2{,}24$ мГ

3-7. $w=2090$; $H=4780$ А/м; $B=60\cdot10^{-4}$ Т; $\Phi=960\cdot10^{-8}$ Вб.

3-8. Условие 1. *Случай а*: $H=7250$ А/м; $B=91\cdot10^{-4}$ Т; $\Phi=2000\cdot10^{-8}$ Вб; $L=0{,}05$ Г. Случай *б*: $H=7250$ А/м; $B=1{,}68$ Т; $\Phi=370\,000\cdot10^{-8}$ Вб; $L=9{,}25$ Г; $\mu=185$.

Условие 2. *Случай а*: $H=21\,750$ А/м; $B=273\cdot10^{-4}$ Т; $\Phi=6000\cdot10^{-8}$ Вб; $L=0{,}15$ Г. *Случай б*: $H_{ст}=7250$ А/м; $B_{ст}=1{,}68$ Т; $\Phi=370\,000\cdot10^{-8}$ Вб; $\Phi_{рс}=6000\cdot10^{-8}$ Вб; $\Phi_{ст}=364\,000\cdot10^{-8}$ Вб; $L=9{,}25$ Г.

Условие 3. $B_{ст}=1{,}68$ Т; $H_{ст}=7250$ А/м; $H=1\,342\,000$ А/м; $I\omega=16\,710$ А; $I=3{,}35$ А; $L=5{,}53$ Г.

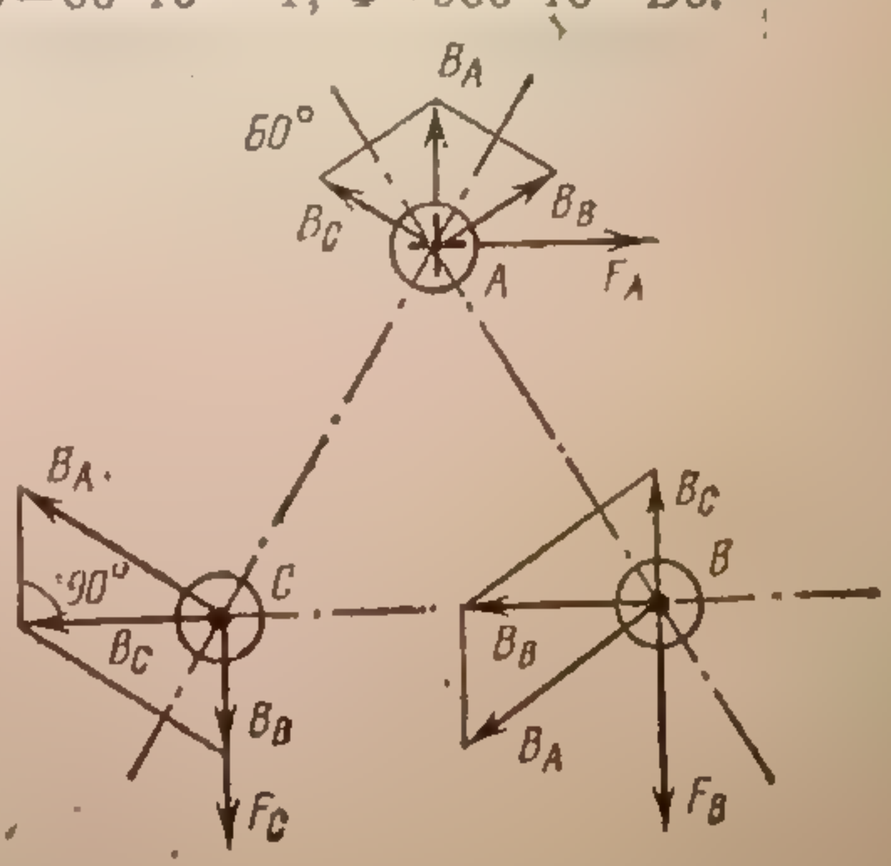


Рис. 13-1. К задаче 3-5.

Условие 4. $\Phi = 335\,000 \cdot 10^{-8}$ Вб; $B_{ст} = B_{\delta} = 1{,}53$ Т; $H_{ст} = 2890$ А/м; $H_{\delta} = 1{,}2 \cdot 10^{6}$ А/м; $I\omega = 10\,000$ А; $L = 8{,}4$ Г.

К вопросам и упражнениям 3-8

1. а) $B = 12{,}56 \cdot 10^{-4}$ Т; $\Phi = 251 \cdot 10^{-8}$ Вб; б) $B = 1{,}35$ Т; $\Phi = 270\,000 \cdot 10^{-8}$ Вб;

$$\frac{L_б}{L_а} = \frac{\Phi_б}{\Phi_а} = \frac{\mu_б}{\mu_а} = 1080.$$

2. а) $B = 25{,}12 \cdot 10^{-4}$ Т; $\Phi = 502 \cdot 10^{-8}$ Вб; б) $B = 1{,}36$ Т; $\Phi = 270\,000 \cdot 10^{-8}$ Вб; поток рассеяния $\Phi_{рс} = 502 \cdot 10^{-8}$ Вб; поток от намагничивания стали $\Phi_{ст} = 269\,496 \cdot 10^{-8}$ Вб, $\mu_{ст} = 1080$;

$$\frac{L_б}{L_а} = \frac{\Phi_б}{\Phi_а} = 540.$$

3. При увеличении тока в 2 раза индукция увеличится в 1,42 раза, магнитная проницаемость и индуктивность уменьшатся в 1,4 раза.

При увеличении тока в 3 раза магнитная индукция увеличится в 1,57 раза, магнитная проницаемость и индуктивность уменьшатся в 1,76 раза.

4. Магнитный поток уменьшится.

5. Нужно увеличить ток.

6. $w = 2380$ витков. При уменьшении тока в 2 раза индуктивность увеличится, $L = 5{,}25$ Г. При увеличении тока в 2 раза индуктивность уменьшится, $L = 2{,}32$ Г.

7. Ток 1 А — пермаллой 65НП.

Ток 2 А — электротехническая сталь марки 1512 (Э42).

Ток 2,7 А — электротехническая сталь марки 1211 (Э11).

Ток 3,6 А — мягкая кованая сталь марки Ст2.

3-9. Условие 1. *Случай а:* $B_1 = 16{,}8 \cdot 10^{-3}$ Т; $B_2 = 33{,}6 \cdot 10^{-3}$ Т; $\Phi_1 = 0{,}42 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_2 = 0{,}84 \cdot 10^{-4}$ Вб; $L_1 = L_2 = 13{,}2$ мГ.

Случай б: $B_1 = 1{,}6$ Т; $B_2 = 1{,}7$ Т; $\Phi_1 = 40 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_2 = 42{,}5 \cdot 10^{-4}$ Вб; $L_1 = 1280$ мГ; $L_2 = 680$ мГ.

Условие 2. При токе 2,5 А $\Phi_{ст} = 39{,}58 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_{рс} = 0{,}42 \times 10^{-4}$ Вб; $\mu = 317$. При токе $I = 5$ А $\Phi_{ст} = 41{,}66 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_{рс} = 0{,}84 \times 10^{-4}$ Вб; $\mu = 166$.

3-10. Условие 1. Ток нужно увеличить до 13,3 А.

Условие 2. Поток уменьшится с $42{,}5 \cdot 10^{-4}$ до $23{,}6 \cdot 10^{-4}$ Вб, т. е. в 1,8 раза.

3-11. а) 4 А; б) 0,88 А.

3-12. $w = 3230$; $F_н = 12{,}84$ Н; $S_{пров} = 2$ мм^2; $l_{пров} = 550$ м; $r = 48{,}4$ Ом; $U_к = 24{,}2$ В.

К вопросам и упражнениям 3-12

1. а) 288 Н; б) 72 Н.

2. 6,4 и 96 Н.

3. При $\delta_1 = 5$ мм $B_1 = B_Б = B_В = 0{,}775$ Т; $B_2 = 1{,}55$ Т; $B_\delta = 0{,}775$ Т. При $\delta_1 = 1$ мм $B_1 = B_Б = B_В = 0{,}2$ Т; $B_2 = 0{,}4$ Т; $B_\delta = 0{,}2$ Т.

4. В случаях «б», «г», «в», «а».

3-13. Условие 1. $I=1{,}66$ А; $l=84{,}2$ м. Условие 2. 90 Н.

3-14. Условие 1. Для тяговой силы $F=2000$ Н при $\delta=0{,}1$ см $I=1{,}08$ А; при $\delta=0$ $I=0{,}282$ А.

Для тяговой силы $F=15\,000$ Н при $\delta=0{,}1$ см $I=6$ А; при $\delta=0$ $I=3{,}75$ А.

Условие 2. При $I=1{,}08$ А и $\delta=0$ $F'=10\,000$ Н, тяговая сила возрастает в

$$\frac{F'}{F}=\frac{10\,000}{2000}=5 \text{ раз}.$$

При $I=6$ А $F'=16\,800$ Н, тяговая сила возрастает в

$$\frac{F'}{F}=\frac{16\,800}{15\,000}=1{,}12 \text{ раза}.$$

Сопоставляя результаты для условия 2, можно сделать вывод, что с увеличением тока в обмотке уменьшается влияние воздушного зазора на тяговую силу в обмотке электромагнита, так как сталь насыщается и $H_1l_1+H_2l_2$ становится больше, чем $H_\delta\delta$ в воздушном зазоре.

3-15. $E=20$ В; $I=4$ А; $F=F_т=8$ Н; $P_{эл.м}=P_{мех}=80$ Вт; $P=72$ Вт; $P_0=8$ Вт; $U=18$ В.

3-16. $I_{пуск}=10$ А; $F_{пуск}=2$ Н.

Для случая «а» $F=1$ Н; $I=5$ А; $v=10$ м/с; $P_{подв}=20$ Вт; $P_{мех}=10$ Вт; $P_0=10$ Вт.

К вопросам и упражнениям 3-15, 3-16

1. Короткое замыкание; генераторный режим; холостой ход; режим двигателя.

2. Короткое замыкание; генераторный режим; режим двигателя и снова режим двигателя.

3. Изменение магнитного потока, пронизывающего контур.

4. Для схемы рис. 3-19, *а* движение магнита вверх, э. д. с. положительная; для схемы рис. 3-19, *б* движение магнита вниз, э. д. с. отрицательная.

5. Электродвижущая сила отрицательная, направление ее по виткам слева направо.

6. Направления э. д. с. в случаях: а) вниз; б) по виткам катушки слева направо; в) в обмотке *2* по виткам слева направо.

3-17. Ответы для токов $I=0$; 16; 32; 40 А даны в таблице.

I, А	E, В	U, В	$F_т$, Н	F, Н	$P_{мех}$, Вт	$P_{эл}$, Вт	P, Вт	P_0, Вт	η, %	r, Ом	Режим работы
0	20	20	0	0	0	0	0	0	—	∞	Холостой ход
16	20	12	32	32	320	320	192	128	60	0,75	Нагрузка
32	20	40	64	64	640	640	128	512	20	0,125	Нагрузка
40	20	0	80	80	800	800	0	800	0	0	Короткое замыкание

3-18. Ответы для нагрузки $F_т=0$; 20; 40; 60 и 80 Н даны в таблице. $I_{пуск}=40$ А; $F_{пуск}=80$ Н.

$F_т$, Н	F, Н	I, А	E, В	v, м/с	$P_{эл}$, Вт	$P_{мех}$, Вт	P_0, Вт	η, %	Режим
0	0	0	20	10	0	0	0	—	Холостой ход
20	20	10	15	7,5	200	150	50	75	Нагрузка
40	40	20	10	5	400	200	200	50	Нагрузка
60	60	30	5	2,5	600	150	450	25	Нагрузка
80	80	40	0	0	800	0	800	0	Короткое замыкание.

3-19. Условие 1. Ответы в таблице

I, А	E, В	U, В	$M_т$, Н·м	$M_{вр}$, Н·м	$P_{мех}$, Вт	$P_{эл}$, Вт	P, Вт	P_0, Вт	η, %	r, Ом	Режим работы
0	25	25	0	0	0	0	0	0	—	∞	Холостой ход
5	25	22,5	3,96	3,96	125	125	112,5	12,5	90,5	4,52	Нагрузка
10	25	20	7,95	7,95	250	250	200	50	80	2	Нагрузка
20	25	15	15,8	15,8	500	500	300	200	60	0,75	Нагрузка
50	25	0	39,6	39,6	1250	1250	0	1250	0	0	Короткое замыкание

Условие 2. Ответы даны в таблице. $I_{пуск}=46$ А; $M_{пуск}=36,5$ Н·м

$M_т$, Н·м	$M_{вр}$, Н·м	I, А	E, В	n, об/мин	$P_{эл}$, Вт	$P_{мех}$, Вт	P_0, Вт	η, %	Режим работы
0	0	0	23	276	0	0	0	100	Холостой ход
5	5	6,3	19,9	236	144	124	20	87	Нагрузка
10	10	12,6	16,7	200	290	210	80	73	Нагрузка
20	20	25,2	10,4	125	580	260	320	45,4	Нагрузка
30	30	38	4	48	870	150	720	17,4	Нагрузка
36,5	36,5	46	0	0	1070	0	1070	0	Короткое замыкание

3-20. Условие 1. $I_к=27,5$ А; $I=9,2$ А; $T_к=10$ с; $T=0$; $(e)_{Lt=0}=-110$ В.

Условие 2. $T=2,5$ с; $(e)_{Lt=0}=440$ В; $(u)_{t=0}=330$ В.

К вопросам и упражнениям 3-20

1. 7 А; —280 В; 1 с.

2. —160 и —40 В.

3. $I=20$ А; $(e_L)_{t=0}=3000$ В; $(u)_{t=0}=2800$ В; $T=0,27$ с (5τ).

4-1. Условие 1. Для параллельной обмотки $y_1=2$; $y=y_к=1$; $y_2=1$; $E=34$ В. Для последовательной обмотки $y_1=2$; $y=y_к=4$; $y_2=2$; $E=68$ В.

Условие 2. Для машины с параллельной обмоткой якоря $I_{я.в1}=20$ А, $M_{я1}=4{,}3$ Н·м. Для машины с последовательной обмоткой якоря $I_{я.в2}=10$ А, $M_{я2}=4{,}3$ Н·м.

К вопросам и упражнениям 4-1

1. Для параллельной обмотки $y_1=4$; $y=y_к=1$; $y_2=3$. Для последовательной обмотки $y_1=4$; $y=y_к=8$; $y_2=4$.
2. Для параллельной обмотки $y_1=6$; $y=y_к=1$; $y_2=5$. Для последовательной обмотки $y_1=6$; $y=y_к=12$; $y_2=6$.
3. 236 В.
4. Не изменится.

4-2. а) $E=116$ В; $I_я=40$ А; $M_я=30$ Н·м; $P_{эл.м}=4{,}64$ кВт. б) $E=232$ В; $I_я=20$ А; $M_я=30$ Н·м; $P_{эл.м}=4{,}64$ кВт.

4-3. а) $E=232$ В; $I_я=40$ А; $M_я=60$ Н·м, $P_{эл.м}=9{,}28$ кВт. б) $E=464$ В; $I_я=20$ А; $M_я=60$ Н·м; $P_{эл.м}=9{,}28$ кВт.

4-4. $U_0=7{,}9$ В; $I_в=0$; $r_р=\infty$.
$U_1=118$ В; $I_в=0{,}372$ А; $r_р=105$ Ом.
$U_2=205$ В; $I=0{,}745$ А; $r_р=63$ Ом.
$U_3=237$ В; $I_в=0{,}995$ А; $r_р=25$ Ом.
$U_4=264$ В; $I_в=1{,}24$ А; $r_р=0$.

4-5 Условие 1. $E_{х.х}=264$ В; $E_1=225$ В; $E_2=205$ В; $E_3=247{,}6$ В; $E_4=175{,}6$ В; $\Delta E_1=5$ В (под действием реакции якоря); $\Delta E_2=25$ В (под действием реакции якоря и уменьшения напряжения на выводах параллельной обмотки возбуждения); $\Delta F_3=-17{,}6$ В (увеличение э. д. с. под действием последовательной намагничивающей обмотки возбуждения); $\Delta E_4=54{,}4$ В (под действием реакции якоря, последовательной размагничивающей обмотки возбуждения и уменьшения напряжения на выводах параллельной обмотки возбуждения). Электрический к. п. д. для генераторов с самовозбуждением: 92,5; 90; 88%.

Условие 2. Для генератора с независимым возбуждением 243,8 В и 0,9 А;
для генератора с параллельным возбуждением 264 В и 1,24 А;
для генератора со смешанным согласным возбуждением 230 В и 0,9 А;
для генератора со смешанным встречным возбуждением 301,5 В и 2,36 А.

К вопросам и упражнениям 4-4, 4-5

1.

Случаи	U, В	$I_в$, А	E, В
а	186	0,9	204
б	78	0,304	96
в	204	0,8	222
г	23	0,09	41

2.

Случаи	U, В	$I_в$, А	E, В
а	224	0,9	228,5
б	215	0,84	219,5
в	237	0,925	241,5
г	203	0,79	207,5

3. 5,9 А; 2,35 В.
4. а) 3; б) 2; в) 4; г) 1.

4-6. Условие 1. 119,5 и 134,5 В.
Условие 2. 105,4 и 134,5 В.

4-7. Ответы сведены в таблицу.

№ п/п.	$I_н$, А	$I_в$, А	$I_я$, А	E, В	$P_{эл.м}$, кВт	$P_{эл}$, Вт	$\eta_э$, %
1	2,2	0,217	2,417	248	0,6	100	83
2	7	0,545	7,545	123	0,925	125	87
3	6,1	0,38	6,48	244	1,575	175	89
4	16,6	0,582	17,2	118	2,034	134	83
5	130,4	5,45	135,85	120	16,25	1250	92
6	117	4,9	121,9	239	29,25	2250	93

4-8. $P_{эл.м}=6{,}85$ кВт; $I_в=26{,}9$ А; $I_в=1{,}4$ А; $r_я=0{,}45$ Ом; $r_в=164$ Ом; $E=254$ В.

4-9. 1. $E_1=E_2=242$ В; 2. а) $E_1=240$ В; $E_2=245$ В; б) $E_1=230$ В; $E_2=260$ В; в) $E_1=250$ В; $E_2=230$ В.

4-10. $P_1=2{,}64$ кВт; $P_{мех}=2{,}43$ кВт; $P=2{,}17$ кВт; $\eta=83\%$; $M_{вр}=15{,}4$ Н·м; $M_0=1{,}6$ Н·м; $M=13{,}8$ Н·м.

К вопросам и упражнениям 4-10

1. а) 266 А; б) 8,5 Ом; в) 1500 об/мин; г) 805 об/мин; д) 1430 об/мин.

2. 38 А.

3. «в» и «г».

4. «б» и «а».

4-11. а) 2830 об/мин; 580 Вт; 98 В; б) 3080 об/мин; 36 Вт; 107 В; в) 3170 об/мин; 0 Вт; 110 В; г) 1730 об/мин; 1440 Вт; 50 В; д) 1730 об/мин; 144 Вт; 60 В; е) 4370 об/мин; 325 Вт; 101 В.

4-12. Ответы для двигателей 1, 2, 6 сведены в таблицу.

№	P, кВт	P_1, кВт	$P_{мех}$, кВт	$P_{м.я}$, кВт	$P_в$, кВт	P_0, кВт	η, %	$M_{вр}$, Н·м	M, Н·м	M_0, Н·м
1	19,0	22,5	20,66	0 96	0,88	1,66	84,5	132	121	11
2	8,0	9,45	8,73	0,342	0,38	0,73	85,0	83	76	7
6	0,3	0,418	0,358	0,03	0,03	0,058	72,0	3,40	2,85	0,55

4-13. Ответы для двигателей 1, 2, 6 сведены в таблицу. Обозначения величин те же, что в задаче 4-12.

№ п/п.	Случаи	$I_я$, А	n, об/мин	$P_{мех}$, кВт	P_0, кВт	P, кВт	P_1, кВт	$M_{вр}$, Н·м	К.п.д. η, %
1	а	147	2200	30,4	2,44	28	32,3	132 const	87
	б	98	2250	20,66 const	2,49	18,2	21,5	87,5	85
2	а	124	1480	12,9	1,08	11,82	13,6	83 const	87
	б	82,55	1500	8,73 const	1,1	7,63	9,1	55,5	84
6	а	5,3	1440	0,515	0,084	0,431	0,58	3,4 const	74
	б	3,53	1500	0,358 const	0,087	0,27	0,388	2,27	70

4-14. Для двигателя 1 $r_р=0{,}715$ Ом, $\eta=56\%$. Для двигателя 6 $r_р=9{,}55$ Ом, $\eta=48\%$.

4-15. $r_{пуск.р}=0{,}8$ Ом; $M_{вр}=370$ Н·м; $M_{вр.пуск}/M_{вр}=2$; $n=760$ об/мин.

4-16. Ответы сведены в таблицу.

Условие	Частота вращения двигателя, об/мин, при токах якоря			
	$I_{я.н}$	$1{,}5I_{я.н}$	$I_{я.н}/1{,}5$	$I_я=0$, хол. ход
1	750	745	755	760
2	750	495	1130	25 600
3	750	635	850	1150

5-1. Условие 1. $T=0{,}02$ с; $f=50$ Гц; $\omega=314$ рад/с; $E_м=1$ В; $\Phi_м=31{,}8\cdot10^{-4}$ Вб; $e=E_м\sin(\omega t+\psi)$ и $\Phi=\Phi_м\sin(\omega t+\psi+90°)$. Кривые э. д. с. и потока, а также векторные диаграммы представлены на рис. 5-2.

Условие 2. Выражения мгновенных э. д. с. те же, что по условию 1.

$$E_м=w\Phi_м\omega=2Blvw;$$

К вопросам и упражнениям 5-1

1. а) $e=E_м\sin(\omega t-180°)$, б) $e=E_м\sin(\omega t-30°)$; в) $e=E_м\sin(\omega t+30°)$. Для всех трех случаев э. д. с. отстает по фазе от магнитного потока на четверть периода.

2. $E_{м1}=850$ В и $E_{м2}=170$ В.

3. а) $u=169\sin(\omega t+120°)$; $i_1=10\sin(\omega t+90°)$; $i_2=20\sin(\omega t+30°)$.

Ток i_1 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_1=30°$, ток i_2 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_2=90°$.

$$б)\ u=169\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right);\quad i_1=10\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{4}\right);$$

$$i_2=20\sin(\omega t\pm\pi).$$

Ток i_1 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_1=45°$; ток i_3 опережает по фазе напряжение на угол $\varphi_2=90°$.

в) $u=169\sin(\omega t-90°)$; $i_1=10\sin(\omega t-60°)$; $i_2=20\sin(\omega t-150°)$.

Ток i_1 опережает по фазе напряжение на угол $\varphi_1=30°$; ток i_2 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_2=60°$.

г) $u=169\sin(\omega t+180°)$; $i_1=10\sin(\omega t+90°)$; $i_2=20\sin(\omega t+150°)$.

Ток i_1 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_1=90°$, ток φ_2 отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_2=30°$,

4. Рисунок 5-4, *а*.

5-2. Векторная диаграмма представлена на рис. 5-4, *а*, а кривые токов и напряжения на рис. 5-5. Углы сдвига фаз $\varphi_1=30°$, $\varphi_2=90°$. Промежутки времени $t_1=1/600$ с и $t_2=1/200$ с.

5-3. 1) $i = I_м \sin \omega t$; 2) $i = I_м \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$; 3) $i = I_м \times$ $\times \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$; 4) $i = I_м \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$.

5-4. $\varphi_1 = -\pi/6$ — напряжение отстает по фазе от тока i_1; $\varphi_2 = \pi/2$ — напряжение опережает по фазе ток i_2.

5-5. Для векторов на рис. 5-7, *а* $e_1 = E_{1м} \sin(\omega t + 90°)$; $e_2 = E_{2м} \sin(\omega t - 30°)$; $e_3 = E_{3м} \sin(\omega t - 150°)$.

Для векторов на рис. 5-7, *б* $\Phi = \Phi_м \sin(\omega t - 45°)$; $e = E_м \sin(\omega t - 135°)$; $u = U_м \sin(\omega t + 45°)$.

5-6. $n = 3000$ об/мин; $f = 50$ Гц; $\omega = 312$ рад/с; $T = 0{,}02$ с; $\omega_{рот} = 314$ рад/с.

5-7. $n = 75$ об/мин; $\omega_{рот} = 7{,}86$ рад/с; $\omega = 314$ рад/с.

6-1. Условие 1. $\gamma_I = \frac{r_а}{r} \cdot 100$.

Условие 2. а) $\gamma_{U,\%} = \frac{r_0}{r_в} \cdot 100$; б) $\gamma_{U,\%} = \frac{r_0 r}{(r_0 + r) r_в} \cdot 100$.

Условие 3. $\gamma_\% = \gamma_{кл.точн} \frac{A_н}{A} + \gamma_{методич}$.

К вопросам и упражнениям 6-1.

1. а) 0,1%; б) 10%.
2. 0,025%.
3. 0,024%.
4. 5 и 1,875%.
5. 37,5 и 3,13%.
6. 0,5+5=5,5% и 0,5+1,25=1,75%.
7. 0,4+2,5=2,9% и 0,4+0,75=1,15%.
8. «г»; «а»; «б»; «в».

6-2. Условие 1. $I_в = 0{,}0662$ А; $U_в = 119$ В; $I_а = 10$ А; $U_а = 0{,}4$ В; $P_а = 4$ Вт; $P_в = 7{,}9$ Вт.

Условие 2. $\gamma_I = 0{,}334\%$ и $\gamma_{общ} = 0{,}334 + 3{,}75 = 4{,}1\%$.

Условие 3. а) $\gamma_U = 0{,}00556\%$; $\gamma_{общ} = 0{,}00556 + 1{,}88 \approx 1{,}9\%$; б) $\gamma_U = 0{,}0055$; $\gamma_{общ} = 0{,}0055 + 1{,}9 \approx 1{,}9\%$.

6-3. $U_1 = 25$ В; $U_2 = 95$ В. При $r_в = 500$ Ом $U_{в1} = 23{,}2$ В; $U_{в2} = 88$ В; $\gamma_1 = \gamma_2 = 7{,}9\%$. При $r_в = 1000$ Ом $U_{в1} = 28{,}5$ В; $U_{в2} = 91{,}5$ В; $\gamma_1 = \gamma_2 = 4\%$. При $r_в = 4000$ Ом $U_{в1} = 24{,}8$ В; $U_{в2} = 94$ В; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0{,}992\%$.

Замечание. С увеличением сопротивления вольтметра изменение напряжения уменьшается. Для данного примера при $r_в = 4000$ Ом можно считать, что включение вольтметра практически не оказывает влияния на напряжения участков.

Условие 4. Практически показание амперметра — нуль, вольтметра 120 В. Точно $I = 0{,}0665$ А, $U = 119{,}7$ В.

6-4. $U_{AB} = 51{,}3$ В; $I_{1к.з} = 125$ А; $I_{2к.з} = 54$ А; $U_{к.з} = 0$.

6-5. При измерении по схеме рис. 6-4, *а* $\gamma_{общ} = 9\%$. При измерении по схеме рис. 6-4, *б* $\gamma_{общ} = -9{,}75\%$.

6-6. 3,75%.

К вопросам и упражнениям 6-5, 6-6

1. $\gamma_{сх.а} < \gamma_{сх.б}$ при $r_а r_в < r_x^2$. $\gamma_{сх.б} < \gamma_{сх.а}$ при $r_x^2 < r_а r_в$; $\gamma_{сх.а} = \gamma_{сх.б}$ при $r_а r_в = r_x^2$.

2. а) Стрелка прибора отклонится в крайнее правое положение против деления на верхней шкале ∞; б) стрелка прибора отклонится в крайнее левое положение против деления на верхней шкале 0; в) подвижная часть прибора будет находиться в состоянии безразличного равновесия.

6-7. $\gamma_{общ,\%}=\gamma_{а,\%}+\gamma_{в,\%}+\gamma_{сх,\%}$. При пользовании схемой рис. 6-4, *а* $\gamma_{общ}=5{,}45\%$; при пользовании схемой рис. 6-4, *б* $\gamma_{общ}=-7{,}75\%$.

6-8. Относительные погрешности в процентах: 6,2; 3,2; 2,5; 2,2; 1,9; 1,7.

6-9. $r_x=20$ Ом.

6-10. Цена деления у амперметров 0,2 А/дел, у вольтметров 10 В/дел.

Показания приборов в цепи постоянного тока: амперметра 2 А, вольтметра 120 В для всех систем.

Показания приборов в цепи переменного тока: амперметра и вольтметра магнитоэлектрической системы — нуль; амперметра электромагнитной и электродинамической систем 1,41 А (7 делений шкалы), вольтметра электромагнитной и электродинамической систем 85 В (8,5 делений шкалы).

6-11. Условие 1. $r_ш=0{,}04$ Ом; $r_а\approx0{,}04$ Ом.
Условие 2. $r_{доб}=9980$ Ом; $r_в=10\,000$ Ом.

6-12. 1. $I=2$ А; $U=120$ В. 2. 3996 Ом. 3. 184 Вт. 4. 147 068 ч, 5900 оборотов диска.

6-13. 0,355 А.

6-14. 85 В.

6-15. 0,00167 Ом и 75 мВ.

6-16. $p_{ш1}=500$; $p_{ш1}=0{,}0302$ Ом; $p_{ш2}=1000$; $r_{ш2}=$ Ом.

6-17. Коэффициенты добавочного сопротивления: 200, 1000, 10 000, 20 000.

Добавочные сопротивления: 1990, 9990, 99 990, 199 990 Ом.

Сопротивление вольтметра: 2000, 10 000, 100 000, 200 000 Ом.

6-18. 1. 0,05; 0,1; 0,25; 0,5 А/дел. 2. 1 и 2 В/дел. 3. 5, 10 и 20 Вт/дел.

6-19. 0,2 Вт·ч/об; 3,1%. Показания счетчика являются завышенными против действительного расхода энергии.

6-20. 800°С=1073 К; 16 °С/дел и 6 мкА/дел.

6-21. Предел 2000 об/мин, 10 в/дел и 80 об/мин·дел.

7-1. Условие 1. $u=U_м\sin\omega t$; $p=P_м\sin^2\omega t$; $U_м=169$ В; $P_м=480$ Вт; $I=2$ А; $U=120$ В; $P=240$ Вт; $\cos\varphi=1$; $W=1{,}92$ кВт·ч.

Условие 2. $u=U_м\sin(\omega t+90)$; $U_м=225$ В; $p=P_м\sin 2\omega t$; $Q=320$ вар; $W_{магн.поля}=1{,}02$ Дж; $I=2$ А; $U=160$ В; $P=0$; $\cos\varphi=0$.

Условие 3. $u=U_м\sin(\omega t+\varphi)$; $U_м=282$ В; $\varphi=53°$; $\cos\varphi=0{,}6$; $I=2$ А; $U=220$ В; $P=240$ Вт; $Q=320$ вар; $S=400$ В·А.

7-2. Условие 1. $i=I_м\sin(\omega t+90)$; $W_{эл.поля}=1{,}02$ Дж; остальное то же, что в задаче 7-1, условие 2.

Условие 2. $i=I_м\sin(\omega t+\varphi)$. Остальное то же, что в задаче 7-1, условие 3.

К вопросам и упражнениям 7-1 и 7-2

1. $r=12$ Ом; $I=10$ А; $U=120$ В; $P=1200$ Вт; $P_м=2400$ Вт.
2. $U=127$ В; $I=10$ А; $P=0$; $P_{макс}=Q=1270$ вар.
3. При увеличении частоты в 4 раза ток и магнитный поток во столько же раз уменьшатся, индуктивность станется неизменной.
4. Ток уменьшится в 4 раза, поток уменьшится в 2 раза.

5. Для реактора с магнитопроводом вдвое большего сечения ток будет в 2 раза меньше. Для реактора с магнитопроводом вдвое большей длины ток будет в 2 раза больше. Магнитный поток в обоих случаях не зависит от размеров магнитопровода и остается неизменным.

6. Ток и магнитный поток пропорционально возрастут.

7. $r=5$ Ом; $L=10{,}57$ мГ; $S=2{,}4$ кВ·А; $Q=1{,}328$ вар; $\cos\varphi=0{,}834$.

8. $I=14{,}2$ мА; $U=71$ В; $f=1000$ Гц; $C=0{,}0318$ мкФ; $Q=1$ вар; $W_{\text{м.эл.поля}}=1{,}59\cdot10^{-4}$ Дж.

9. Векторная диаграмма представлена на рис. 7-11; $I=4$ А; $P=240$ Вт; $U=120$ В; $U_a=60$ В; $U_c=104$ В.

10. «в»; «г»; «а»; «б».

7-3. 5 А и 80 В.

7-4. 25 Ом и 2 А.

7-5. $u=310\sin 314t$ В; $i=28{,}2\sin 314t$ А; $P_м=8800$ Вт; $P=4400$ Вт; $W=26{,}4$ кВт·ч.

Мощность и расход энергии при изменении частоты не изменятся.

7-6. $f=50$ Гц; $\Phi_м=628\,000$ Мкс$=628\,000\cdot10^{-8}$ Вб.

7-7. $f=71{,}6$ Гц; $I=7$ А; $Q=700$ вар; $U=100$ В; $\Phi_м=318\,000$ Мкс.

7-8. 122 В.

7-9. Условие 1. $i=17{,}9\sin(314t-36°50')$ А; $e_L=107{,}25\sin(314t-126°50')$ В; $u_р=107{,}2\sin(314t+53°10')$ В; $u_а=143\sin(314t-36°50')$ А.

Условие 2. $I=12{,}7$ А; $U=127$ В; $P=1290$ Вт; $\cos\varphi=0{,}08$.

7-10. 0,09 Г.

7-11. $r=30{,}8$ Ом; $x_L=31{,}4$ Ом; $P=770$ Вт; $Q=785$ вар.

7-12. $I=0{,}7$ А; $\varphi=84°20'$; $\cos\varphi=0{,}0975$; $x_L=314$ Ом; $P=15{,}1$ Вт; $Q=154$ вар.

7-13. Ответы сведены в следующую таблицу.

Случаи	P, Вт	r, Ом	x, Ом	Q, квар	S, кВ·А	I, А	U, В
а	1100	11	$x_C=19$	1,9	2,2	10	220
б	1100	11	$x_L=19$	1,9	2,2	10	220
в	0	0	$x_L=2{,}2$	2,2	2,2	10	220
г	2200	22	$x=0$	0	2,2	10	220

7-14. $L=1{,}085$ Г; $U_к=310$ В; $\cos\varphi=0{,}577$.

7-15. Условие 1. $i=0{,}0564\sin\left(314t+\frac{\pi}{2}\right)$ А; $q=179\cdot10^{-6}\sin 314t$ Кл; $W_м=0{,}0081$ Дж.

Условие 2. $P=0$; $Q=5{,}08$ вар.

7-16. Условие 1. $I=0{,}104$ А; $I_a=0{,}0347$ А; $U_c=55$ В; $Q=22{,}8$ вар; $Q_c=1{,}9$ вар; $W=0{,}0726$ Дж; $W_c=0{,}00605$ Дж.

Условие 2. По сравнению с решением задачи по условию 1 энергия электрического поля не изменится, а ток и реактивная мощность увеличатся в 10 раз.

7-17. Показания приборов, активное сопротивление и реактивная мощность не зависят от частоты: $r=15$ Ом; $Q=416$ вар.

При частоте 50 Гц $C=122$ мкФ; $W=0{,}33$ Дж.

При частоте 100 Гц $C=61$ мкФ, $W=0{,}495$ Дж.

7-18. При частотах $f=0$; 25; 50; 100; 1000 Гц токи соответственно будут равны: 0; 0,5; 0,997; 1,97 и 10,3 А.

7-19. Условие 1. При $l=40$ км $I=0{,}0597$ А; $U_{чел}=5970$ В. При $l=1$ км $I=0{,}018$ А; $U_{чел}=1800$ В.

Ток больше 0,05 А опасен для жизни человека.

Условие 2. При $l=40$ км $I=0{,}119$ А; $U_{чел}=5950$ В; при $l=1$ км $I=0{,}0185$ А; $U_{чел}=927$ В.

Ток больше 0,05 А опасен для жизни человека.

7-20. Условие 1. $I=4{,}36$ А; $U_1=35$ В; $P_1=153$ Вт; $\cos\varphi_1=1(\varphi_1=0°)$; $U_2=45{,}6$ В; $P_2=57$ Вт; $\cos\varphi_2=0{,}287$; $U=65$ В; $P=210$ Вт; $\cos\varphi=0{,}738$; $Q=191$ вар; $S=285$ В·А.

Условие 2. $I=4$ А; $U_1=333$ В; $\cos\varphi_1=0{,}97$; $P_1=128$ Вт; $U_2=40{,}8$ В; $\cos\varphi_2=0{,}287$; $P_2=48$ Вт; $U=65$ В; $\cos\varphi=0{,}68$; $P=176$ Вт; $Q_1=32$ вар; $Q_2=160$ вар; $Q=192$ вар.

Условие 3. $I=18$ А; $U_2=187$ В; $\cos\varphi_2=0{,}29$; $P_2=P=980$ Вт; $U_3=216$ В; $P_3=0$; $\cos\varphi_3=0$; $U=65$ В; $\cos\varphi=0{,}835$; $Q_2=3260$ вар; $Q_3=3910$ вар; $Q=650$ вар; $W_{магн.поля}=10{,}4$ Дж; $W_{эл.поля}=12{,}5$ Дж.

7-21. $f_{рез}=10$ кГц.

К вопросам и упражнениям 7-20 и 7-21

1. $I=5{,}9$ А; $U_1=47{,}3$ В; $P_1=279$ Вт; $\cos\varphi_1=1$; $U_2=17{,}7$ В; $P_2=105$ Вт; $\cos\varphi_2=1$; $U=65$ В; $P=384$ Вт; $\cos\varphi=1$.

2. $I=5{,}4$ А; $U_1=11$ В; $P_1=0$; $\cos\varphi_1=0$; $U_2=54$ В; $P_2=0$; $\cos\varphi_2=0$; $U=65$ В; $P=0$; $\cos\varphi=0$; $Q_1=59$ вар; $Q_2=294$ вар; $Q=353$ вар.

3. При частоте 50 Гц — 2, 10, 12 Ом.
При частоте 100 Гц — 4, 20, 6 Ом.
При частоте 1000 Гц — 40, 200, 0,6 Ом.
При частоте 10 000 Гц — 400, 2000, 0,06 Ом.

4. 200 Гц, 50 Ом.

5. Векторная диаграмма рис. 7-19, *а* для случая «а»; векторная диаграмма рис. 7-19, *б* для случая «б»; векторная диаграмма 7-19, *в* для случаев «в» и «г».

6. Векторная диаграмма рис. 7-19, *а* для случая «г»; векторная диаграмма рис. 7-19, *б* для случая «в»; векторная диаграмма рис. 7-19, *в* для случаев «а» и «б».

7-22. При $L=127$ мГ $I=1{,}73$ А; $U_к\approx70$ В; $U_C=34{,}5$ В; $U_а=10{,}4$ В; $U_L=69$ В; $U_р=34{,}5$ В. Векторная диаграмма представлена на рис. 7-19, *а*.

При $L=63{,}5$ мГ $I=6$ А; $U_к=125$ В; $U_c=120$ В; $U_а=36$ В; $U_L=120$ В; $U_р=0$. Векторная диаграмма представлена на рис. 7-19, *б*.

При $L=31{,}75$ мГ $I=3{,}07$ А; $U_{реакт}=36$ В; $U_C=61{,}4$ В; $U_а=18{,}4$ В; $U_L=30{,}7$ В; $U_р=30{,}7$ В. Векторная диаграмма представлена на рис. 7-19, *в*.

7-23. Условие 1. При $\cos\varphi=0{,}8$ $I_1=125$ А, $Q_1=37{,}5$ квар. При $\cos\varphi=0{,}6$ $I_2=167$ А, $Q_2=67$ квар При $\cos\varphi=0{,}4$ $I_3=250$ А, $Q_3=114$ квар. Векторная диаграмма дана на рис. 7-20, схема замещения на рис. 7-21.

Условие 2. $S_н=500$ кВ·А. При $\cos\varphi=0{,}8$ $N_1=8$, $P_1=400$ кВт, $Q_3=300$ квар; при $\cos\varphi=0{,}6$ $N_2=6$, $P_2=300$ кВт, $Q_2=400$ квар; при $\cos\varphi=0{,}4$ $N_3=4$, $P_3=200$ кВт; $Q_3=456$ квар.

7-24. $I_1=22{,}7$ А; $\cos\varphi_1=0.6$; $I_2=32{,}8$ А; $\cos\varphi_2=0{,}84$. Векторная диаграмма представлена на рис. 7-22.

К вопросам и упражнениям 7-23 и 7-24

1. $\cos\varphi_2=0{,}94$.

2. При нагрузке 3 кВт $I=2{,}27$ А, $\cos\varphi=0{,}6$. При нагрузке 1,5 кВт $I=19{,}5$ А, $\cos\varphi=0{,}35$. При нагрузке 9 кВт $I=44{,}8$ А, $\cos\varphi=0{,}914$.

7-25. При $\cos\varphi_2=1$ $\eta=98\%$; при $\cos\varphi_2=0{,}8$ $\eta=97\%$; при $\cos\varphi_2=0{,}5$ $\eta=92{,}5\%$.

7-26. Условие 1. $I_1=7{,}9$ А; $I_2=6{,}2$ А; $I=10{,}3$ А; $\cos\varphi=0{,}92$; $P=615$ Вт; $P_1=500$ Вт; $P_2=115$ Вт; баланс мощностей $615=500+115$ Вт.

Условие 2. $r_2=9{,}35$ Ом; $x_2=31$ Ом; $I_2=8{,}24$ А.

7-27. Условие 1. $I_{c1}=4{,}13$ А; $C_1=60$ мкФ; $Q_{c1}=910$ вар; $I_{c2}=10{,}27$ А; $C_2=149$ мкФ; $Q_{c2}=2250$ вар; $P_1=P=1500$ Вт; $S=1650$ В·А; $S_1=2200$ В·А; $Q_1=1580$ вар; $Q=670$ вар. Балансы реактивных мощностей: при отстающем токе $Q=Q_1-Q_{c1}=(670=1580-910$ вар) и при опережающем токе $Q=Q_{c2}-Q_1(670=2250-1580$ вар).

Условие 2. $I_{c\text{рез}}=7{,}2$ А; $C_{\text{рез}}=104$ мкФ; $I=I_{1a}=6{,}8$ А; $P=S=1500$ Вт; $Q_c=Q_1=1580$ вар; $Q=0$.

7-28. $f_{\text{рез}}=80$ Гц.

К вопросам и упражнениям 7-26 — 7-28

1. При заданных x_1 и x_2 резонанс токов будет иметь место, так как соблюдается условие $r^2=x_1x_2$. При увеличении или уменьшении частоты в n раз условие для резонанса токов сохраняется, т. е. будет иметь место перманентный резонанс.

2. При заданных x_1 и x_2 резонанс токов будет иметь место, так как соблюдается условие $x_1=x_2$ при $r_1=r_2$. При увеличении или уменьшении частоты в n раз резонанса токов не будет, так как необходимые условия для него при $r_1=r_2$ нарушаются.

3. 8,35 Ом.

4. 101 Ом; ∞; 101 Ом.

5. 24,1 Ом; ∞.

6. При замкнутом контакте K_1 — векторная диаграмма рис. 7-33, *б*; при замкнутом контакте K_2 — векторная диаграмма рис. 7-33, *в*; при замкнутом контакте K_3 — векторная диаграмма рис. 7-33, *г*; при замкнутом контакте K_4 — векторная диаграмма рис. 7-33, *а*.

7. При разомкнутых контактах — векторная диаграмма рис. 7-35, *г*; при замкнутом контакте K_1 — векторная диаграмма рис. 7-35, *в*; при замкнутом контакте K_2 — векторная диаграмма рис. 7-35, *б*; при замкнутых контактах K_1 и K_3 — векторная диаграмма рис. 7-35, *а*.

7-29. Условие 1. Векторная диаграмма показана на рис. 7-25, *б*.

$$I=14{,}4\text{ А};\quad \cos\varphi=1;\quad P=3{,}456\text{ кВт}.$$

Условие 2. Векторная диаграмма показана на рис. 7-33, *б*.

$$I=9\text{ А};\quad \cos\varphi=0{,}8;\quad P=1{,}72\text{ кВт}.$$

Условие 3. Векторная диаграмма показана на рис. 7-33, *в*.

$I = 28{,}8$ А; $\cos\varphi = 0{,}945$; $P = 6{,}6$ кВт.

Условие 4. Векторная диаграмма показана на рис. 7-33, *г*.

$I = 9$ А; $\cos\varphi = 0{,}8$; $P = 1{,}72$ кВт.

Условие 5. Векторная диаграмма показана на рис. 7-33, *а*.

$I = 28{,}8$ А; $\cos\varphi = 0{,}945$; $P = 6{,}6$ кВт.

Условие 6. Векторная диаграмма показана на рис. 7-28, *б*.

$I = 0$; $\cos\varphi = 0$; $P = 0$.

7-30. Условие 1. Векторная диаграмма показана на рис. 7-35, *г*.

$I = 12{,}25$ А; $\cos\varphi = 0{,}77$; $P = 615$ Вт.

Условие 2. Векторная диаграмма показана на рис. 7-35, *в*.

$I = 11{,}4$ А; $\cos\varphi = 0{,}674$; $P = 500$ Вт.

Условие 3. $I = 29{,}4$ А; $\cos\varphi \approx 1$; $P = 1{,}915$ кВт.

Условие 4. $I = 11{,}6$ А; $\cos\varphi = 0{,}855$; $P = 645$ Вт.

7-31. 8,54 Ом и 376 мкФ. Показания приборов: $I = 9{,}5$ А; $\cos\varphi = 1$; $P = 620$ Вт.

7-32. Условие 1. $r = 0{,}705$ Ом; $x_L = 1{,}61$ Ом; $r' = 4{,}42$ Ом; $x'_L = 1{,}93$ Ом.

Условие 2. Ответы сведены в таблицу.

$\cos\varphi$	0,4	0,6	0,8	1	0,8	0,6	0,4
I, А	125	83,5	62,5	50	62,5	83,5	125
C, мкФ	0	685	1100	1650	2180	2610	3300
P, кВт	11	11	11	11	11	11	11
Q, квар	25,2	14,6	8,25	0	—8,25	—14,6	—25,2

8-1. Для соединения выводов x, y, z: $U_A = U_B = U_C = 127$ В; $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 127 \cdot \sqrt{3} = 220$ В.

Для соединения x, B, z: $U_A = U_y = U_C = 127$ В; $U_{Ay} = U_{yC} = 127$ В; $U_{CA} = 220$ В.

Для соединения A, B, C: $U_x = U_y = U_z = 127$ В; $U_{xy} = U_y = U_{zx} = 220$ В.

8-2. Условие 1. $I_A = 30$ А; $I_B = 120$ А; $I_C = 60$ А; $I_0 = 80$ А.

Условие 2. $U'_B = 78$ В; $U_0 = 46$ В; $I_A = 40$ А; $I_B = 78$ А; $I_C = 68$ А; $\overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C = 0$ (определяется графически из векторной диаграммы).

8-3. 1) *При нормальной работе.* Для печи с $\cos\varphi = 0{,}8$ фазные напряжения потребителя $U'_A = U'_B = U'_C = 220$ В; линейные токи $I_A = I_B = I_C = 20$ А; узловое напряжение между нейтралями $U_0 = 0$.

Для печи с $\cos\varphi = 1$ $U'_A = U'_B = U'_C = 220$ В; $I_A = I_B = I_C = 16$ А; $U_0 = 0$.

2) *При коротком замыкании на фазе A.* Для печи с $\cos\varphi=0{,}8$ $U'_A=0$; $U'_B=U'_C=380$ В; $I_B=I_C=34{,}5$ А; $I_A=60$ А; $P=21$ кВт.

Для печи с $\cos\varphi=1$ $U'_A=0$; $U'_B=U'_C=380$ В; $I_B=I_C=27{,}7$ А; $I_A=48$ А; $P=21$ кВт.

При обрыве фазы A (перегорание предохранителя). Для печи с $\cos\varphi=0{,}8$ $U'_A=330$ В; $U'_B=U'_C=190$ В; $I_A=0$; $I_B=I_C=17{,}25$ А; $P=5{,}25$ кВт. Для печи с $\cos\varphi=1$ $U'_A=330$ В; $U'_B=U'_C=190$ В; $I_A=0$; $I_B=I_C=13{,}8$ А; $P=5{,}25$ кВт.

К вопросам и упражнениям 8-1 — 8-3

1. При правильном соединении $\bar{E}=\bar{E}_A+\bar{E}_B+\bar{E}_C=0$. При неправильном соединении $|E|=|\bar{E}_A+\bar{E}_C-\bar{E}_B|=254$ В.

2. $I_ф=I_л=11$ А; $I_0=0$; $U_ф=220$ В; $P=5790$ Вт.

Обрыв нейтрального провода не влияет на работу цепи, так как ток нейтрального провода равен нулю.

3. 1) $I_0=6$ А; 2) $I_0=6$ А; 3) $I_0=0$; 4) $I_0=6$ А; 5) $I_0=8{,}5$ А.

Ток в нейтральном проводе определяется из векторной диаграммы.

4. $I_0=10$ А Характер нагрузки: фаза A — активная, $\cos\varphi_A=1$; фаза B — индуктивная, $\cos\varphi_B=0{,}5$; фаза C — индуктивная, $\cos\varphi_C=\frac{\sqrt{3}}{2}$.

5. «а»; «г»; «б»; «в».

8-4. Условие 1. Для всех случаев $U_B=U_C=70$ В; $I_B=I_C=7$ А.

1) $r_B=r_C=8{,}64$ Ом; $x_B=x_C=5$ Ом; $I_0=12{,}1$ А; $P_B=P_C=424$ Вт.

2) $r_B=r_C=10$ Ом; $x_B=x_C=0$; $I_0=7$ А; $P_B=P_C=490$ Вт.

3) $r_B=r_C=5$ Ом; $x_B=x_C=8{,}64$ Ом; $I_0=14$ А; $P_B=P_C=245$ Вт.

4) $r_B=10$ Ом; $r_C=5$ Ом; $x_B=0$; $x_C=8{,}64$ Ом; $I_0=0$; $P_B=490$ Вт; $P_C=245$ Вт.

5) $r_B=10$ Ом; $r_C=5$ Ом; $x_B=0$; $x_C=8{,}64$ Ом; $I_0=12{,}1$ А; $P_B=490$ Вт; $P_C=245$ Вт.

6) $r_B=0$; $r_C=5$ Ом; $x_B=10$ Ом; $x_C=8{,}64$ Ом; $I_0=9{,}87$ А; $P_B=0$; $P_C=245$ Вт.

7) $r_B=0$; $r_C=8{,}64$ Ом; $x_B=10$ Ом; $x_C=5$ Ом; $I_0=0$; $P_B=0$; $P_C=424$ Вт.

Ток в нулевом проводе определяется из векторной диаграммы.

Условие 2. 1) $I_B=I_C=7$ А; $U_B=U_C=70$ В; $P_B=P_C=424$ Вт.

2) $I_B=I_C=6{,}06$ А; $U_B=U_C=60{,}5$ В; $P_B=P_C=366$ Вт.

3) $I_B=I_C=12{,}1$ А; $U_B=U_C=121$ В; $P_B=P_C=734$ Вт.

4 и 5) $I_B=I_C=7$ А; $U_B=U_C=70$ В; $P_B=490$ Вт; $P_C=245$ Вт.

6) $I_B=I_C=6{,}27$ А; $U_B=U_C=62{,}7$ В; $P_B=0$; $P_C=197$ Вт.

7) $I_B=I_C=7$ А; $U_B=U_C=70$ В; $P_B=0$; $P_C=424$ Вт.

Условие 3. Для всех случаев $I_B=I_C=12{,}1$ А.

1) $I_A=24{,}2$ А; $P=2530$ Вт; 2) $I_A=12{,}1$ А; $P=2930$ Вт; 3) $I_A=20{,}9$ А; $P=1465$ Вт; 4) $I_A=12{,}1$ А; $P=2197$ Вт; 5) $I_A=24{,}2$ А; $P=2197$ Вт; 6) $I_A=20{,}9$ А; $P=732{,}5$ Вт; 7) $I_A=12{,}1$ А; $P=1265$ Вт.

Линейный ток I_A определяется из векторной диаграммы.

8-5. $I_{ab}=27{,}5$ А; $I_{bc}=23{,}6$ А; $I_{cd}=11{,}8$ А; $P=7$ кВт.

Токи на участках нулевого провода определяются из векторной диаграммы.

8-6. При перегоревшем предохранителе в первой группе ламп $I_{ab}=I_{bc}=I_{cd}=11{,}8$ А; $P=3$ кВт.

Токи на участках нулевого провода определяются графически из векторной диаграммы.

8-7. Условие 1. Векторная диаграмма представлена на рис. 13-2, *а*; $U'_A=0$; $U'_B=U'_C=208$ В; $I_B=20{,}8$ А; $I_C=10{,}4$ А; $I_A=27{,}5$ А; $U_0=120$ В; $\overline{I}_A+\overline{I}_B+\overline{I}_C=0$.

Условие 2. Векторная диаграмма представлена на рис. 13,2, *б*. $U'_A=187$ В; $U'_B=69$ В; $U''_C=139$ В; $I_A=0$; $I_B=6{,}9$ А; $I_C=6{,}9$ А; $U_0=69$ В.

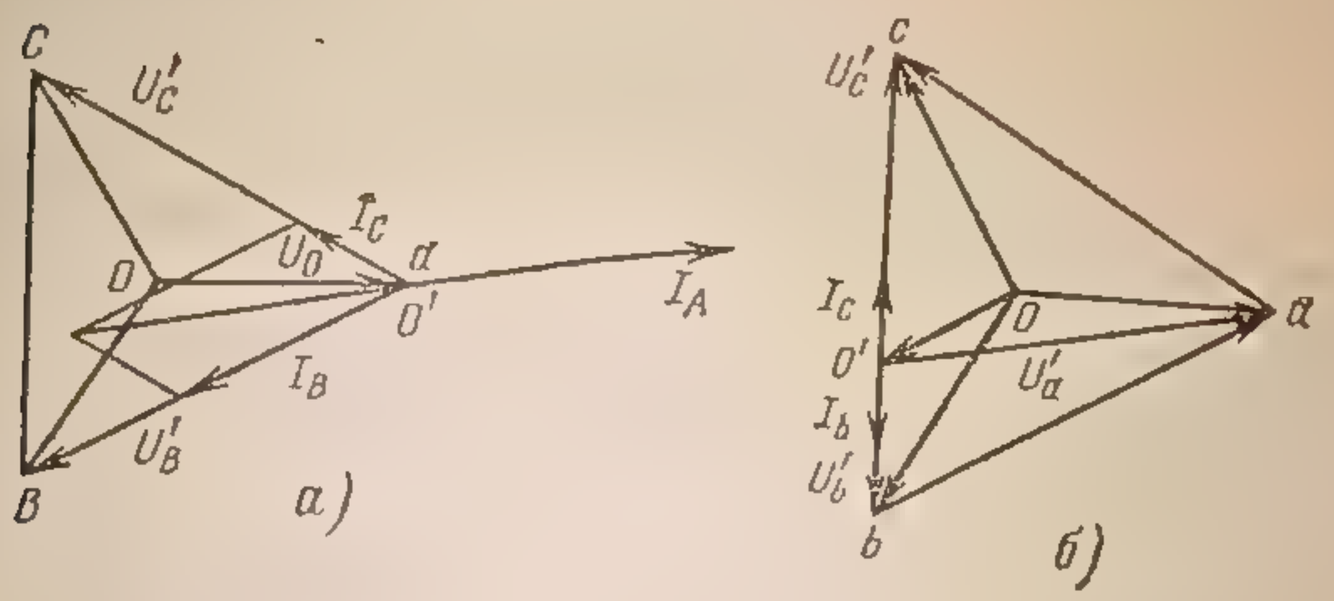


Рис. 13-2. К задаче 8-7.

8-8. 1) При замыкании рубильника *1* $I_B=I_C=12$ А; $I_A=0$; 2) при замыкании рубильника *2* $I_A=I_C=12$ А; $I_B=20{,}8$ А; 3) при замыкании рубильника 3 $I_A=I_B=12$ А; $I_C=20{,}8$ А.

8-9. В первом случае линейные токи и мощность увеличатся в 3 раза, $\cos\varphi$ не зависит от способа соединения потребителя. Во втором случае сопротивления фаз потребителя (активные и реактивные) нужно увеличить в 3 раза.

8-10. Условие 1. $U_ф=U_л=220$ В; $I_{AB}=16{,}4$ А; $I_{BC}=I_{CA}=27$ А; $I_A=I_B=38$ А; $I_C=47$ А. Линейные токи определяются графически из векторной диаграммы (рис. 8-18).

Условие 2. $I_{BC}=27$ А; $I_{CA}=I_{AB}=10{,}2$ А; $U_{BC}=220$ В; $U_{CA}=83{,}3$ В; $U_{AB}=136{,}7$ В; $I_A=0$; $I_B=I_C=37{,}2$ А.

Условие 3. $I_{AB}=0$; $I_{BC}=I_{CA}=27$ А; $I_A=27$ А; $I_B=27$ А; $I_C=46{,}7$ А; $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=220$ В.

К вопросам и упражнениям 8-9, 8-10

1. Условие 1. При линейном напряжении 380 В соединение обмоток в звезду; $P=8235$ Вт; $I_ф=I_л=15{,}6$ А.

При линейном напряжении 220 В соединение обмоток в треугольник; $P=8235$ Вт; $I_л=27$ А; $I_ф=15{,}6$ А.

2. а) При соединении в звезду $I_л=I_ф=10$ А. При соединении в треугольник $I_л=30$ А; $I_ф=17{,}3$ А; $P_Δ=3P_Y=7{,}98$ кВт.

б) При соединении в звезду $z_ф=12{,}7$ Ом; $r=8{,}88$ Ом; $x_L=9{,}05$ Ом.

При соединении в треугольник все сопротивления нужно увеличить в 3 раза.

3. При перегорании предохранителя в фазе $A'B'$ $I_A=15$ А; $I_B=15$ А; $I_C=26$ А; $P=1600$ Вт.

При перегорании предохранителя в линейном проводе AA' $I_A=0$; $I_B=I_C=22{,}5$ А; $P=1200$ Вт.

4. $I_{AB}=10$ А; $I_{BC}=I_{CA}=20$ А; $I_A=I_B=17{,}3$ А; $I_C=34{,}6$ А.

5. При разомкнутом рубильнике *3*.

8-11. Условие 1. $U=220$ В; $I_{AB}=5{,}4$ А; $I_{BC}=27{,}2$ А; $I_{CA}=32{,}6$ А; $I_A=36$ А; $I_B=31$ А; $I_C=51{,}5$ А. Линейные токи определены графически из векторной диаграммы, представленной на рис. 13-3.

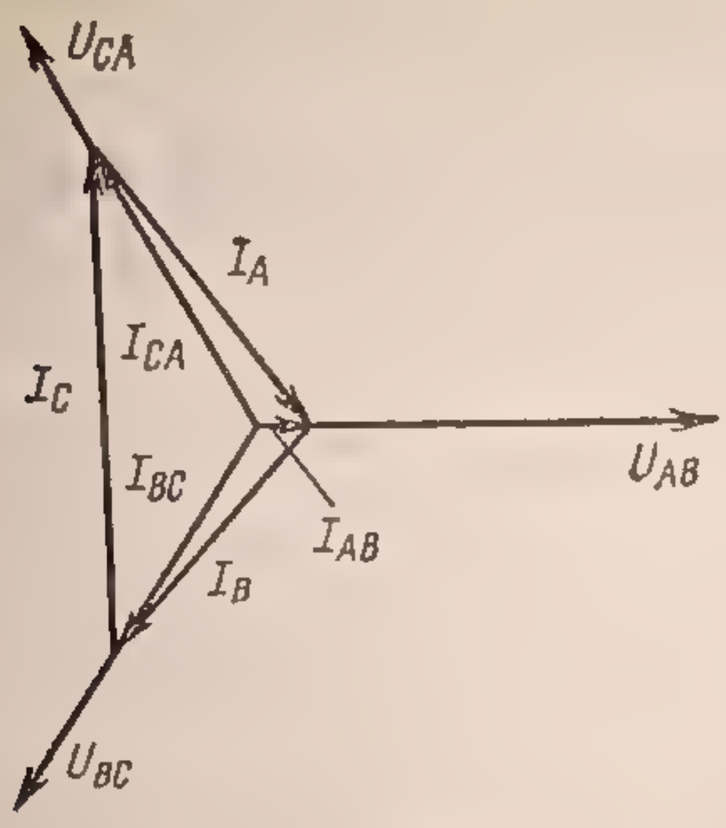


Рис. 13-3. К задаче 8-11.

Условие 2. При перегорании предохранителя *1* (рис. 8-20) $I_A=0$; $I_B=I_C=31{,}8$ А; $I_{BC}=27{,}2$ А; $I_{AB}=I_{CA}=4{,}6$ А; $U_{BC}=220$ В; $U_{AB}=188$ В; $U_{CA}=32$ В.

При перегорании предохранителя *2* (рис. 8-20) $I_B=0$; $I_A=I_C=37$ А; $U_{AB}=184$ В; $U_{BC}=36$ В; $U_{CA}=220$ В.

При перегорании предохранителя *3* (рис. 8-20) $I_C=0$; $I_A=I_B=20{,}2$ А; $U_{AB}=220$ В; $U_{BC}=120$ В; $U_{CA}=100$ В.

Условие 3. Напряжение ламп каждого этажа $U=220$ В. При отключении ламп первого этажа (фаза AB) $I_A=32$ А; $I_B=27{,}2$ А; $I_C=53$ А.

При отключении ламп второго этажа (фаза BC) $I_A=36$ А; $I_B=5{,}4$ А; $I_C=32{,}6$ А.

При отключении ламп третьего этажа (фаза CA) $I_A=5{,}4$ А; $I_B=30$ А; $I_C=27{,}2$ А.

8-12. При замкнутом рубильнике $I_{AB}=18$ А; $I_{BC}=I_{CA}=10{,}4$ А; $I_A=I_B=I_C=20{,}8$ А; $P=4320$ Вт; $Q=0$.

При разомкнутом рубильнике $I_{AB}=18$ А; $I_{BC}=I_{CA}=6$ А; $I_A=I_B=24$ А; $I_C=0$; $P=2880$ Вт; $Q=0$.

8-13. Условие 1. При $r_{з1}=10^6$ Ом $U_{чел}=2940$ В; $I_{чел}=0{,}0588$ А (опасно для жизни).

При $r_{з2}=1$ Ом $U_{чел}\approx 0$; $I_{чел}\approx 0$.

Условие 2. $R_{чел}=59$ Ом.

Условие 3. $U_{чел}=0$.

Условие 4. При $r_{з1}=10^6$ Ом $U_{чел}=3000$ В; $I_{чел}=0{,}06$ А (опасно для жизни).

Замечание. При прикосновении человека к корпусу машины человек и сопротивление заземления соединены параллельно и оказываются под напряжением $U_{чел}$. При этом ток через заземление $I_{з1}=3000/10^6=0{,}003$ А; при $r_{з2}=1$ Ом $I_{з2}=3000/1=3000$ А. В этом случае ток в линии настолько большой, что линия отключится защитой и человек не попадет под напряжение.

8-14. Условие 1. При напряжении в сети 380 В и соединении обмоток в звезду $I_{л1}=16{,}8$ А; $\cos\varphi_1=0{,}52$; при напряжении сети 220 В и соединении обмоток в треугольник $I_{л1}=29$ А; $\cos\varphi_1=0{,}52$.

8-15. $C=1000$ мкФ; $I_л=30$ А; $Q=15{,}2$ квар.

8-16. $C=335$ мкФ; $I_л=30$ А; $Q=15{,}2$ квар. При переключении данного компенсатора на звезду $I_л=40$ А; $\cos\varphi=0{,}75$.

8-17. Условие 1. 433 В.

Условие 2. 406 В.

8-18. $I_л=12{,}7$ А; $I_ф=7{,}35$ А; в конце линии $U'_л=172$ В.

К вопросам и упражнениям 8-16 и 8-17

1. а) $S=22$ мм²; $\Delta U=368$ В; $U_1=6368$ В;
   б) $S=22$ мм²; $\Delta U=184$ В; $U_1=6184$ В.
2. а) $S=22$ мм²; $\Delta U=268$ В; $U_1=6268$ В;
   б) $S=22$ мм²; $\Delta U=134$ В; $U_1=6134$ В.
3. $I_{ф\Delta}=9{,}45$ А; $I_{л\Delta}=16{,}3$ А; $U_{л.ген}=283$ В.

8-19. $S=35$ мм² (сечение по ГОСТ).

8-20. При $\cos\varphi_2=0{,}8$ $U_2=3000$ В; $\Delta U_{\%}=9{,}1$; $\eta=89{,}5\%$. При $\cos\varphi_2=1$ $U_2=3100$ В; $\Delta U_{\%}=6{,}07$; $\eta=90{,}4\%$.

8-21. По таблице приложения 6 выбираем кабель с сечением жилы 120 мм² (по расчету получено сечение 105 мм²).

При $\cos\varphi_2=0{,}8$ $U_1=527{,}4$ В; $\Delta P_{\%}=6{,}9$; при $\cos\varphi_2=1$ $U_1=522$ В; $\Delta P_{\%}=4{,}38$.

9-1. Векторная диаграмма, одна и та же для реактора без магнитопровода и при вставленном магнитопроводе, представлена на рис. 9-2. $L_0=0{,}0627$ Г; $x_{L0}=19{,}7$ Ом; $L=62{,}5$ Г; $x_L=19\,700$ Ом; $\mu=1000$; $\Phi_м=5\cdot10^{-4}$ Вб.

9-2. Векторные диаграммы представлены для реактора без стального магнитопровода на рис. 9-4, для реактора со стальным магнитопроводом на рис. 9-5.

К вопросам и упражнениям 9-1 — 9-3

1. Векторная диаграмма, одна и та же для реактора без магнитопровода и при вставленном магнитопроводе, представлена на рис. 9-2.

$\Phi_м=10^{-3}$ Вб (увеличится в 2 раза независимо от наличия магнитопровода).

Для реактора без стального магнитопровода $L_0=0{,}0156$ Г; $x_{L0}=4{,}95$ Ом (уменьшится в 4 раза).

Для реактора со стальным магнитопроводом $L=15{,}6$ Г; $x_L=4{,}925$ Ом (уменьшится в 4 раза); $\mu=1000$.

2. Магнитный поток уменьшится в 2 раза.
3. Ответы сведены в таблицу.
4. «б», «а», «г», «в».

Случаи	r_0, Ом	$r_{экв}$, Ом	x_L, Ом	E, В
а	0	0	22	220
б	0	4	21,6	216
в	4	0	21,6	220
г	4	8	20,4	208

9-3. Условие 1. Каркас из эбонита, $I=109$ А; магнитопровод из электротехнической стали марки 1512 (Э42), $I=13{,}7$ мА; магнитопровод из электротехнической стали марки 1211 (Э11), $I=47{,}8$ А.

Условие 2. Магнитный поток независимо от наличия магнитопровода увеличится в 2 раза. Ток в реакторе при а) каркасе из эбонита, $I=218$ А (увеличится в 2 раза); б) магнитопроводе из электротехнической стали марки 1512 (Э42), $I=65$ мА (увеличится в 4,74 раза); в) магнитопроводе из электротехнической стали марки 1211 (Э11), $I=162$ мА (увеличится в 3,4 раза).

Условие 3. Магнитный поток независимо от наличия магнитопровода увеличится в 3 раза. Ток в катушке при а) каркасе из эбонита, $I=327$ А (увеличится в 3 раза); б) магнитопроводе из электротехнической стали марки 1512 (Э42), $I=1{,}85$ А (увеличится в 135 раз); в) магнитопроводе из электротехнической стали марки 1211 (Э11), $I=1{,}47$ А (увеличится в 30,8 раза).

9-4. Векторная диаграмма для обоих случаев представлена на рис. 9-4.

Числовые ответы сведены в следующую таблицу.

Рассматриваемые случаи	Определяемые величины				
	$r_{экв}$, Ом	x, Ом	$E=U'$, В	$\Phi_{макс}$, Вб	$\cos\varphi$
При удаленном магнитопроводе	1	17,1	120	$10{,}8\cdot10^{-4}$	0,0584
При вставленном магнитопроводе	1	61	120	$10{,}8\cdot10^{-4}$	0,0163

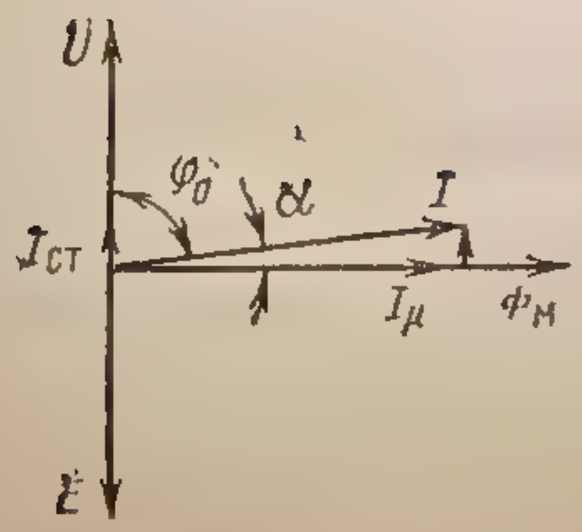


Рис. 13-4. К задачам 9-6, 9-7

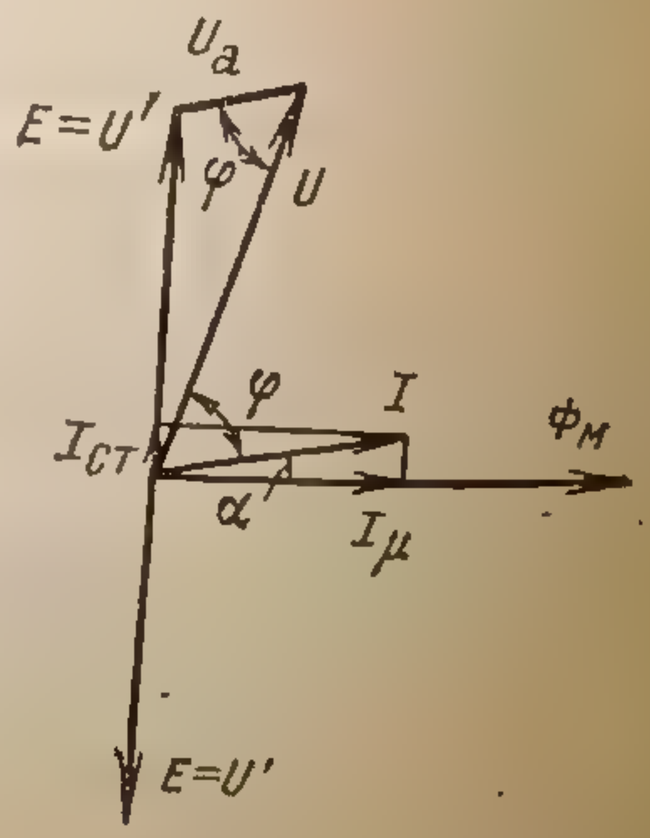


Рис. 13-5. К задаче 9-8.

9-5. Условие 1. $L_1=350$ мГ; $L_2=81{,}7$ мГ; $L_3=34{,}2$ мГ.

Условие 2. При половинной частоте $I_1=3{,}95$ А; $I_2=13{,}6$ А; $I_3=19{,}4$ А. При частоте, равной нулю, $I=22$ А независимо от положения сердечника.

9-6. Векторная диаграмма представлена на рис. 13-4; $\cos\varphi=0{,}131$; $I_\mu=5{,}64$ А; $I_{ст}=0{,}746$ А.

9-7. Векторная диаграмма представлена на рис. 13-4; $\cos\varphi = 0{,}175$; $I = 5{,}72$ А; $P = 142$ Вт; $I_{ст} = I_г + I_в = 0{,}746 + 0{,}254 = 1$ А, где $I_в$ — составляющая активного тока, обусловленная потерями от вихревых токов. Намагничивающая составляющая тока остается без изменения: $I_\mu = 5{,}64$ А.

9-8. $E = 125$ В; $\Phi_м = 0{,}00282$ Вб; $\cos\varphi = 0{,}226$; $P_м = 72$ Вт; $P_{ст} = 100$ Вт; $I_\mu = 5{,}94$ А; $I_{ст} = 0{,}8$ А.

Векторная диаграмма представлена на рис. 13-5.

9-9. Векторная диаграмма представлена на рис. 9-11. $I_0 = 0{,}975$ А; $\cos\varphi_0 = 0{,}226$; $\varphi_0 = 76°$; $\alpha = 14°$; $w_2 = 134$.

9-10. $I_0 = 3{,}6$ А; $\cos\varphi_0 = 0{,}482$. Векторная диаграмма представлена на рис. 9-13.

9-11. $S_н = 10$ кВ·А; $r_1 = 13{,}5$ Ом; $r_2 = 0{,}06$ Ом; $\eta = 0{,}96$ при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ и $\eta = 0{,}97$ при $\cos\varphi_2 = 1$; $x_{s1} = 27{,}8$ Ом; $x_{s2} = 0{,}124$ Ом; $z_1 \approx 31$ Ом; $z_2 = 0{,}137$ Ом.

К вопросам и упражнениям 9-9 — 9-11

1. а) 3,7 кВ·А; б) 9,75 и 29,3 А; в) $S_1 = 4{,}875$ мм²; $S_2 = 14{,}65$ мм²; $r_1 = 0{,}35$ Ом; $r_2 = 0{,}0386$ Ом.

2. 63 и 57 витков.

3. «г», «в», «б», «а».

9-12. Векторная диаграмма представлена на рис. 9-11. $I_0 = 1{,}025$ А; $\cos\varphi_0 = 0{,}628$; $\varphi_0 = 74°30'$; $\alpha = 15°30'$, $w_2 = 54$.

9-13. При первом условии $\eta = 0{,}885$; при втором условии $\eta = 0{,}906$.

9-14. Условие 1. $I_1 = 2{,}5$ А; $w_1 = 1070$; $I_2 = 20$ А; $w = 134$.

Условие 2. а) $x_1 = x_2 = 0$; б) $x_1 = 10{,}6$ Ом; $x_2 = 0{,}165$ Ом.

Условие 3. $I_{1к.з} = 12{,}5$ А; $I_{2к.з} = 100$ А.

9-15. 1) группа 0, $k/k_\Phi = 1$; 2) группа 6, $k/k_\Phi = 1$; 3) группа 11, $k/k_\Phi = \sqrt{3}$. Стандартизованы по ГОСТ группы Y/Y-0 и Y/Δ-11.

9-16. Условие 1. $U_{02} = 220$ В; $I'_{02} = I''_{02} = 0$; $I'_2 = I''_2 = 50$ А.

Условие 2. $U_{02} = 220$ В; $I'_{02} = I''_{02} = 0$; $I'_2 = 150$ А; $I''_2 = 75$ А.

Условие 3. $U_{02} = 217{,}5$ В; $I'_{02} = I''_{02} = 37{,}5$ А; $I'_2 = 150$ А; $I''_2 = 50$ А.

Условие 4. 1. $U_1 - U_2 = 0$. Параллельная работа возможна. 2. $U_1 - U_2 = 440$ В. Параллельная работа невозможна.

К вопросам и упражнениям 9-15, 9-16

1. У трансформатора, первичная обмотка которого соединена в треугольник, число витков на фазу должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше.

2. а) $\overline{U}'_{л2} - \overline{U}''_{л2} = 0$. Параллельная работа возможна.

б) $\overline{U}'_{л2} - \overline{U}''_{л2} = 220$ В. Параллельная работа невозможна.

3. «в», «б», «а» и «г».

4. 4, 2, 3, 1.

9-17. Условие 1. Для соединения Y/Δ; $I_{л1} = I_{ф1} = 2{,}3$ А; $I_{л2} = 36$ А; $I_{ф2} = 21$ А.

При полной нагрузке и $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ $\eta = 0{,}965$; при $\cos\varphi_2 = 1$ $\eta = 0{,}972$.

При половинной нагрузке и $\cos\varphi_2=0{,}8$ $\eta=0{,}975$; при $\cos\varphi_2=1$ $\eta=0{,}98$; $r_1=19$ Ом; $r_2=0{,}23$ Ом; $x_1=36$ Ом; $x_2=0{,}43$ Ом.

Условие 2. Векторная диаграмма для одной фазы трехфазного трансформатора будет такой же, как для однофазного. При $\cos\varphi_2<1$ векторная диаграмма представлена на рис. 9-15.

9-18. Группы соединений: для трансформатора 1 Y/Δ-11, для трансформатора 2 Y/Δ-5. Векторная разность вторичных линейных напряжений 440 В. Параллельная работа невозможна.

9-19. $\dfrac{P_{\text{м.авто}}}{P_{\text{м.тр}}}=\dfrac{M_{\text{м.авто}}}{M_{\text{м.тр}}}=\dfrac{\omega_1-\omega_2}{\omega_1}$.

9-20. Условие 1. $U_1=2400$ В; $I_1=80$ А; $P_1=153{,}6$ кВт; $W_1=1228{,}8$ кВт·ч; $W_2=2048$ Вт·ч.

Условие 2. $E_1=0{,}6$ В; $E_2=12$ В; $E_{2,0}=240$ В.

К вопросам и упражнениям 9-19, 9-20

1. Для трансформатора напряжения $w_2=300$, для трансформатора тока $w_2=40$.

2. «г», «в», «б», «а».

9-21. При вторичном напряжении $U_2=100$ В; $I_1=7{,}9$ А; $w_2=189$; $S_1=3{,}95$ мм²; $S_2=1{,}05$ мм².

При вторичном напряжении $U_2=50$ В; $I_1=3{,}94$ А; $w_2=95$; $S_1=1{,}97$ мм²; $S_2=3{,}03$ мм².

9-22. 20 А.

9-23. $U_1=380$ В; $I_1=40$ А; $P_1=13{,}2$ кВт; показание счетчика до начала работы 9993,7 гВт·ч.

9-24. $U_1=380$ В; $I_1=180$ А; $P=100$ кВт; $\cos\varphi=0{,}85$.

9-25. $U_1=380$ В; $I_1=180$ А; $P=59$ кВт; $\cos\varphi=0{,}5$.

10-1. Обмотка статора представлена на рис. 10-1. Обмотка имеет число проводов $z=12$; шаг по катушке $y_к=3$; шаг по фазе $y_ф=2$; число катушек $k=6$; число катушек на фазу $k_ф=1$; $n_1=1500$ об/мин независимо от способа соединения обмотки статора.

10-2. $2p=2$; $n_1=3000$ об/мин; $z=24$; $q=4$; $\tau=y_к=12$; $y_ф=8$; $k_ф=1$; $k=3$; $E_1=127$ В.

К вопросам и упражнениям 10-1, 10-2

1. Изменится направление вращения магнитного поля статора.

2. $2p=2$; $n_1=3000$ об/мин; $z_1=6$; $q=1$; $y_к=\tau=3$; $y_ф=2$; $k_ф=1$; $k=3$; $E_1=33{,}3$ В.

3. $2p=6$; $n_1=1000$ об/мин; $z_1=18$; $q=1$; $\tau=3$; $y_ф=2$; $y_к=3$; $k_ф=p=3$; $k=3p=9$; $E_1=100$ В.

4. $2p=4$; $n_1=1500$ об/мин; $z_1=36$; $q=3$; $y_к=\tau=9$; $y_ф=6$; $k_ф=2$; $k=6$; $E_1=4{,}44f\Phi_м q k_ф k_1=191$ В.

10-3. При $q=1$ $z=24$; $y_ф=2$; $y_к=3$; $k_ф=4$; $k=12$.

При $q=2$ $z=48$; $y_ф=4$; $y_к=6$; $k_ф=4$; $k=12$.

10-4. Частота вращения изменяется в пределах 1492,5—1440 об/мин, частота тока ротора в пределах 0,25—2 Гц.

10-5. Будет изменяться от 0 до 440 В.

К вопросам и упражнениям 10-4, 10-5

1. Пределы изменения частоты вращения 1790—1730 об/мин. Пределы изменения частоты 0,3—2,4 Гц.

2. «г», «в», «б», «а».

10-6. При соединении в звезду $k=1{,}6$; $U_2=137$ В. При соединении в треугольник $k=1{,}6$; $U_2=238$ В.

10-7. Требуемые кривые представлены на рис. 10-13.

10-8. $2p=4$; $S_н=0{,}05$; $M_н=20$ Н·м; $M_{макс}=44$ Н·м; $M_{пуск}=36$ Н·м.

При соединении в звезду 6,6 и 46 А.

При соединении в треугольник 11,3 и 79 А.

К вопросам и упражнениям 10-7, 10-8

1. cos φ самый низкий при холостом ходе. С увеличением нагрузки cos φ увеличивается (векторная диаграмма на рис. 10-12).

2. При полной нагрузке и номинальном напряжении пуск возможен. При снижении напряжения на 30% пуск невозможен. $M_{пуск}/M_н=0{,}88$; $I_{пуск}/I_н=4{,}9$.

3. Пусковой ток и пусковой момент уменьшатся в 3 раза. При полной нагрузке пуск двигателя невозможен, $(M_{пуск}/3) : M_н=0{,}6$. При 50%-ной нагрузке пуск возможен, $(M_{пуск}/3) : (M_н/2)=1{,}2$.

4. Пусковой ток и пусковой момент уменьшатся в 3 раза. При половинной нагрузке пуск двигателя невозможен, $(M_{пуск}/3):(M_н/2)=0{,}8$. При 25%-ной нагрузке пуск возможен, $(M_{пуск}/3) : (M_н/4)=1{,}6$.

5. $k=1{,}5$. Пуск возможен. Кратность пускового момента при пуске через автотрансформатор и при половинной нагрузке — 1,51.

6. Пуск невозможен. Кратность пускового момента 0,674.

7. «а».

8. «г».

10-9. $2p=2$; $s_н=4\%$; $M_н=0{,}004$ Н·м; $M_{макс}=0{,}0088$ Н·м; $M_{пуск}=0{,}008$ Н·м. При линейном напряжении 220 В (обмотка статора соединена в треугольник) $I_н=0{,}7$ А; $I_{пуск}=3{,}5$ А. При линейном напряжении 380 В (обмотка статора соединена в звезду) $I_н=0{,}4$ А; $I_{пуск}=2{,}0$ А.

10-10. $I_{1л}=29{,}6$ А; $P=8$ кВт; $\eta=0{,}825$.

К вопросам и упражнениям 10-10

1. $\cos\varphi=0{,}86$.

2. $s_0=0{,}05\%$; $\cos\varphi_0=0{,}254$.

3. а) невозможен; б) возможен; в) I_2 и $M_{вр.мако}$ не изменяются, но при увеличении сопротивления реостата в цепи ротора $M_{вр.мако}$ смещается в сторону больших скольжений,

$$s_{мм}=\frac{r_2+R_р}{2x_{2н}};$$

г) пусковой ток будет уменьшаться; д) перегрузочная способность не изменится,

$$\frac{M_{вр.макс}}{M_{вр.н}}=2{,}4.$$

4. 80 об/мин; 580 об/мин; 704 об/мин; 730 об/мин.

10-11. Условие 1. $x_{2н}=0{,}082$ Ом. При номинальной нагрузке $M_{вр}=507$ Н·м; $s_н=0{,}0267$; $I_2=188$ А. При предельной максимальной нагрузке $M_{вр}=1210$ Н·м; $s_{мм}=0{,}122$; $I_2=623$ А; при пуске $M_{вр}=292$ Н·м; $s=1$; $I_2=877$ А.

Условие 2. $k=2{,}52$. При $R_р=0$ 348 А и 292 Н·м. При $R_р=0{,}0122$ Ом 335 А и 558 Н·м. При $R_р=0{,}072$ Ом 250 А и 1210 Н·м. При $R_р=0{,}325$ Ом 209 А и 558 Н·м.

10-12. Условие 1. При номинальной нагрузке $I_1=35{,}5$ А; $s=0{,}08$. При максимальной нагрузке $I_1=67{,}5$ А; $s_{\text{кр}}=0{,}2$; $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}=1{,}45$.

Условие 2. При пуске двигателя с числом полюсов $2p=4$ в качестве короткозамкнутого $I_{1\text{пуск}}=93{,}4$ А; $M_{\text{пуск}}=44{,}5$ Н·м. При пуске двигателя с реостатом $I_{1\text{пуск}}=46{,}7$ А; $M_{\text{пуск}}=98$ Н·м; $r_p=1{,}57$ Ом.

Условие 3. 1,21 Ом.

10-13. $E_0=232$ В; $E=220$ В; $\Delta U_{\%}=5{,}5$. Векторная диаграмма показана на рис. 10-19.

10-14. Условие 1. а) Векторная диаграмма показана на рис. 10-21, *а*. $I=0$; $P=0$; $Q=0$.

б) Векторная диаграмма показана на рис. 10-21, *б*.

$$I=20\text{ А};\quad P=0;\quad Q=13{,}2\text{ квар}.$$

в) Векторная диаграмма показана на рис. 10-21, *в*.

$$I=20\text{ А};\quad P=0;\quad Q=13{,}2\text{ квар}.$$

Условие 2. а) Векторная диаграмма показана на рис. 10-22, *а*.

$$I=76{,}6\text{ А};\quad P=50\text{ кВт};\quad Q=4{,}4\text{ квар}.$$

Условие 3. Векторная диаграмма показана на рис. 10-22, *б*.

$$I=76{,}5\text{ А};\quad P=42{,}5\text{ кВт};\quad M=270\text{ Н·м}.$$

К вопросам и упражнениям 10-13 и 10-14

1. Электродвижущая сила и напряжение в случаях: а) увеличатся, б) уменьшатся.
2. От 0 до 147 В.
3. а) Увеличить частоту вращения ротора и одновременно уменьшить ток в обмотке возбуждения, поддерживая равенство показаний вольтметров. б) Уменьшить частоту вращения ротора и одновременно увеличить ток в обмотке возбуждения, поддерживая равенство показаний вольтметров.
4. 1) Рис. 10-22, *а*. 2) Рис. 10-22, *б*. 3) Рис. 10-21.
5. В режиме генератора «в» и «г». В режиме двигателя «а» и «б».

10-15. $x_{\text{р.с}}=0{,}16$ Ом; $x=0{,}2+0{,}16=0{,}36$ Ом.

10-16. Условие 1. 364 мкФ.

Условие 2. 28 мГ.

10-17. Условие 1. 56,5 А; 21,6 кВт.

Условие 2. $I=56{,}5$ А; $P=18{,}2$ кВт. При частоте вращения $n=3000$ об/мин $M=58$ Н·м (5,95 кгс·м); при $n=1500$ об/мин $M=116$ Н·м (11,8 кгс·м).

11-1. 3,9 кВт; 1440 об/мин.

11-2. 60 мин.

К вопросам и упражнениям 11-1 и 11-2

1. 7,85 кВт.
2. «в»; «а»; «б».

11-3. 5,9 кВт; 960 об/мин.

11-4. 69 мин.

11-5. Схема цепи управления представлена на рис. 11-5.

11-6. Схема цепи управления представлена на рис. 11-7.

К вопросам и упражнениям 11-5 и 11-6

1. Схема цепи управления представлена на рис. 11-3, *а*.

2. а) схема на рис. 11-13; б) схема на рис. 11-12; в) схема на рис. 11-14; г) схема на рис. 11-14.

12-1. $I_a=400$ мА; $P_a=20$ Вт; $N=250\cdot10^{16}$ электронов/с; $v=4{,}2\cdot10^6$ м/с.

12-2. При однополупериодном выпрямлении $U_{обр.макс}=U_м$; $U_0/U=0{,}45$; $I_0/I=0{,}637$. При двухполупериодном выпрямлении $U_{обр.макс}=2U_м$; $U_0/U=0{,}9$; $I_0/I=0{,}9$.

К вопросам и упражнениям 12-1, 12-2

1. $R_i=82$ Ом; $S=12{,}3$ мА/В.

2. а) 100 мА; б) 157 мА.

3. а) 141 мА; б) 111 мА.

4. 189 В.

5. 334 В.

6. При однополупериодном выпрямлении для *б*; при двухполупериодном выпрямлении для *г*.

12-3. Условие 1. Для схемы рис. 12-2, *а* $U_0=90$ В; $U_{обр.макс}=284$ В. Для схемы рис. 12-3 *а* $U_0=180$ В; $U_{обр.макс}=568$ В.

Условие 2. Для схемы рис. 12-2, *а* $U_0=72$ В; $U_{обр.макс}=284$ В. Для схемы рис. 12-3, *а* $U_0=144$ В; $U_{обр.макс}=568$ В.

12-4. 150 и 75 Вт.

12-5. При двухфазном выпрямлении 0,637; при трехфазном 0,827; при шестифазном 0,955.

12-6. Разложение тока и напряжения на составляющие представлено на рис. 12-6.

Переключатель в положении *1*; $U_м=526$ В; $I_м=188$ мА.

Переключатель в положении *2*, *3*, *4*: $U_м=U_0=360$ В; $I_м=I_0=120$ мА.

К вопросам и упражнениям 12-6

1. 1124 В.

2. Для схемы рис. 12-8: при положении переключателя 0 график рис. 12-7, *а*; при положении переключателя *1* график рис. 12-7, *в*; при положении переключателя *2* график рис. 12-7, *б*.

Для схемы рис. 12-9: при положении переключателя *1* график рис. 12-7, *а*; при положении переключателя *2* график рис. 12-7, *в*; при положении переключателя *3* график рис. 12-7, *б*.

12-7. Для положения переключателя *1* $U=100$ В; $I=20$ мА. Для положения переключателя *2* $U=42{,}7$ В; $I=8{,}55$ мА.

12-8. Для положения переключателя *2* $I=20$ мА; $U_a=100$ В; $U_L=42{,}7$ В. Для положения переключателя *3* $I=8{,}55$ мА; $U_a=42{,}7$ В; $U_c=100$ В.

12-9. $r_i=6{,}7$ кОм; $S=3{,}75$ мА/В; $\mu=25$.

12-10. $i_{a.общ}=I_{a.0}+i_a$; $u_{a.общ}=U_{a.0}-u_a$; $k_y=\mu\dfrac{r_a}{r_i+r_a}$.

К вопросам и упражнениям 12-9, 12-10

1. $\Delta I_a=7{,}5$ мА; $\Delta U_0=2$ В; $\Delta U_a=50$ В; $S=3{,}75$ мА/В; $r_i=6{,}7$ кОм; $\mu=25$.

2. $S=4$ мА/В; $r_i=4$ кОм; $\mu=16$.

3. $r_i=10$ кОм.

4. Увеличится на 10,5 мА.
5. $U_{с2}=0$.
6. «г»; «в»; «а»; «б».

12-11. $U_{вх}=2{,}12$ В; $U_{вых}=25{,}6$ В; $k_у=12$.

12-12. $U=71$ В; $k_у=25$.

12-13. $k_у=7{,}5$; $u_{а.общ}=200-22{,}5\sin\omega t$ В.

12-14. 3,55 В.

12-15. 25.

12-16. $i_{а.общ}=16+4\sin\omega t$ мА; $u_{а.общ}=200-20\sin\omega t$ В; $u_{с.общ}=-4+2\sin\omega t$ В; $U_{вх}=1{,}42$ В; $U_{вых}=14{,}2$ В; $k_у=10$; $r_а=5{,}8$ кОм.

12-17. Условие 1. При расположении зарядов, показанном на рис. 12-13, лампа открыта при заряде и разряде конденсатора. При изменении знака заряда на обкладках конденсатора в обоих случаях лампа заперта.

Условие 2. ~20 кГц.

Условие 3. 1 мГ.

Условие 4. 1 мкФ.

12-18. Для схемы рис. 12-14 $U_{эм}/U_{мэ}=2{,}22$; $I_{эм}/I_{мэ}=1{,}57$.

Для схемы рис. 12-15 $U_{эм}/U_{мэ}=1{,}11$; $I_{эм}/I_{мэ}=1{,}11$.

К вопросам и упражнениям 12-18

1. Для однополупериодного выпрямителя 314 В; для двухполупериодного выпрямителя 156 В.
2. 13,3 мА и 66,5 В.
3. 2400.
4. «в»; «г»; «б».

12-19. Условие 1. $U_2=222$ В; $k=1{,}75$; число последовательных элементов 15; в каждом плече по две параллельные ветви; всего 60 элементов. Средний ток плеча выпрямителя 1 А.

Условие 2. $U_2=111$ В; $k=1{,}15$; число последовательных элементов 7—8; в каждом плече по две параллельные ветви; всего 56—64 элементов. Средний ток плеча выпрямителя 1 А.

Условие 3. $U_2=222$ В; $k=1{,}75$; число последовательных элементов 15; число параллельных ветвей 4; всего 60 элементов; средний ток плеча выпрямителя 2 А.

Условие 4. Для трансформатора при двухполупериодном выпрямлении $I_2=2{,}22$ А; $I_1=1{,}93$ А. Для трансформатора при однополупериодном выпрямлении $I_2=3{,}14$ А; $I_1=5{,}5$ А.

12-20. 2) $i_{к.общ}=70+12\sin\omega t$ мА; $u_{к.общ}=12{,}5-2{,}5\sin\omega t$ В. 3) $I_к=8{,}55$ мА; $U_к=1{,}77$ В. 4) $k_у=10$.

12-21. 2) $i_{к.общ}=70+30\sin\omega t$ мА; $u_{к.общ}=12{,}5+3\sin\omega t$ В. 3) $I_к=21{,}3$ мА; $U_к=2{,}13$ мА. 4) $k_у=12$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТАБЛИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ В ЕДИНОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ SI (СИ) (SYSTEM INTERNATIONAL)

Наименование величин	Буквенное обозначение величины в книге	Основные единицы в Международной системе единиц (СИ)	
		Название	Обозначение
Длина	l	метр	м
Площадь, поверхность	S	кв. метр	$м^2$
Объем	V	куб. метр	$м^3$
Масса	m	килограмм	кг
Время	t	секунда	с
Скорость	v	метр в секунду	м/с
Ускорение	a	метр в секунду за секунду	$м/с^2$
Сила	F	ньютон	Н
Работа	W	джоуль (ватт-секунда)	Дж
Количество теплоты	Q	джоуль	Дж
Температура	Θ	кельвин	К
Угловая скорость, угловая частота	ω	радиан в секунду	рад/с
Плоский угол	$\alpha=\omega t$	радиан	рад
Момент силы	M	ньютон-метр	Н·м
Мощность активная	P	ватт	Вт
Мощность реактивная	Q	вар	вар
Полная мощность	S	вольт-ампер	В·А
Напряжение, электродвижущая сила	U, E	вольт	В
Ток	I	ампер	А
Плотность тока	δ	ампер на кв. метр	$А/м^2$
Заряд, количество электричества	Q	кулон	Кл

Продолжение приложения 1

Наименование величин	Буквенное обозначение величины в книге	Основные единицы в Международной системе единиц (СИ)	
		Название	Обозначение
Напряженность электрического поля	$\mathcal{E}$	вольт на метр	В/м
Емкость	C	фарада	Ф
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ε_a	фарада на метр	Ф/м
Сопротивление	r	ом	Ом
Удельное сопротивление	ρ	ом-метр	Ом·м
Проводимость	g	—	1/Ом
Удельная проводимость	γ	—	См/м
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб
Магнитная индукция	B	тесла (вебер на квадратный метр)	Т
Напряженность магнитного поля	H	амйер на метр	А/м
Абсолютная магнитная проницаемость	μ_a	генри на метр	Г/м
Индуктивность	L	генри	Г
Реактивное (индуктивное, емкостное) сопротивление	x	ом	Ом
Полное сопротивление	z	ом	Ом
Частота	f	герц	Гц

Употребляющиеся единицы других систем

Название единицы	Обозначение	Соотношение с единицей в системе СИ
Килограмм	кгс	9,81 Н
Килограмм-сила-метр	кгс·м	9,81 Н·м (Дж)
Калория	кал	4,19 Дж

Название единицы	Обозначение	Соотношение с единицей в системе СИ
Градус Цельсия	°С	(t °С+273) К
Килограмм-сила на метр в секунду	кгс·м/с	9,81 Вт
Лошадиная сила	1 л.с.$=75\frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{с}}$	736 Вт
Максвелл	Мкс	10^{-8} Вб
Гаусс	Гс	10^{-4} Т
Эрстед	Э	80 А/м

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Наименование материала	Диэлектрическая проницаемость относительно вакуума ε	Электрическая прочность	
		$\mathcal{E}_{пр}$, 10^9 В/м	Измерена при толщине d, мм
Воздух	1,0	3,0	—
Вода дистиллированная	81,0	—	—
Трансформаторное масло	2,2	8,0—16,0	2,5
Бумага, пропитанная парафином	3,4—3,6	20,0—30,0	0,15—0,2
Фарфор	5,3	10,0—15,0	1,0—15,0
Стекло	5,5—9,0	10,0—40,0	—
Слюда	5,0—7,5	80—200	0,05
Миканит	5,2	15,0—20,0	3,0
Резина	2,7	16,0—25,0	1,0—2,5
Полистирол	2,3—2,75	100—110	—
Гетинакс	4,5	8,0—12,0	10,0
Электроизоляционный картон	4,0—6,0	9,0—14,0	1,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наименование материала	Плотность, кг/м³	Удельное сопротивление, мкОм·м = 10^{-6} Ом·м = $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$	Удельная проводимость, 10^6 См/м = $\frac{1}{\text{мкОм}\cdot\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}$	Теплоемкость от 0 до 100°С, Дж/(кг·°С)	Температурный коэффициент сопротивления от 0 до 100°С, °С$^{-1}$	Температура плавления, °С
Медь проводниковая	8900	0,0176	57	0,392	0,004	1084
Алюминий	2700	0,0278	35	0,92	0,004	657
Латунь	8500	0,04	25	0,384	0,002	900
Вольфрам	19 100	0,0612	16,34	0,146	0,0047	3300
Стальная проволока	7900	0,13	7,6	0,46	0,00625	1400
Олово	7300	0,143	7	0,234	0,0044	232
Свинец	11 400	0,221	4,52	0,129	0,0041	327
Нихром	8200	0,98	1,02	—	0,00015	1360
Константан	8800	0,4—0,51	2,5—1,98	—	0,000005	1200
Фехраль	7600	1,4	0,7	—	0,00028	1450
Манганин	8100	0,42	2,38	—	0,000006	960

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДА И ШНУРЫ С РЕЗИНОВОЙ И ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ С МЕДНЫМИ И АЛЮМИНИЕВЫМИ ЖИЛАМИ

Сечение токопроводящей жилы, мм²	Токовые нагрузки, А					
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной трубе				
		Два одножильных	Три одножильных	Четыре одножильных	Один двухжильный	Один трехжильный
0,5	11/—	—	—	—	—	—
0,75	15/—	—	—	—	—	—
1	17/—	16/—	15/—	14/—	15/—	14/—
1,5	23/—	19/—	17/—	16/—	18/—	15/—
2,5	30/24	27/20	25/19	25/19	25/—	21/—
4	41/32	38/28	35/28	30/23	32/—	27/—
6	50/39	46/36	42/32	40/30	40/—	34/—
10	80/55	70/50	60/47	50/39	55/—	50/—
16	100/80	85/60	80/60	75/55	80/—	70/—
25	140/105	115/85	100/80	90/70	100/—	85/—

Примечание. Числитель — нагрузки для медных жил, знаменатель — для алюминиевых жил.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ НА НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ МЕДНЫЕ, АЛЮМИНИЕВЫЕ И СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА

Медные		Алюминиевые		Сталеалюминиевые	
Марка провода	Токовая нагрузка вне помещений, А	Марка провода	Токовая нагрузка вне помещений, А	Марка провода	Токовая нагрузка вне помещений, А
М-4	50	А-16	105	АС-10	80
М-6	70	А-25	135	АС-16	105
М-10	95	А-35	170	АС-25	130
М-16	130	А-50	215	АС-35	175
М-25	180	А-70	265	АС-50	220
М-35	220	А-95	320	АС-70	275
М-50	270	А-120	375	АС-95	335
М-70	340	А-150	440	АС-120	380
М-95	415	А-185	500	АС-150	445
М-120	485	А-240	610	АС-185	515
М-150	570	А-300	—	АС-240	610
М-185	640	А-400	—	—	—
М-240	760	А-500	—	—	—

Примечание. Шкала номинальных токов стандартных плавких вставок, изготовляемых промышленностью: 6; 10; 15; 20; 25; 35; 60; 80; 100; 125; 160; 200; 225; 260; 300; 350—1 000 А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСКАЕМЫЕ РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ В АМПЕРАХ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ, ПРОКЛАДЫВАЕМЫХ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ЗЕМЛЕ. КАБЕЛИ С МЕДНЫМИ ЖИЛАМИ С БУМАЖНОЙ ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ В СВИНЦОВОЙ ИЛИ АЛЮМИНИЕВОЙ ОБОЛОЧКЕ

Номинальное сечение жилы, мм²	Одножильные кабели до 1 кВ	Двухжильные кабели до 1 кВ	Трехжильные кабели с поясной изоляцией			Четырехжильные кабели до 1 кВ
			до 3 кВ	6 кВ	10 кВ	
	Максимально допускаемая температура жилы кабеля					
	80°С	80°С	80°С	65°С	60°С	80°С
10	140	105	95	80	—	85
16	175	140	120	195	95	115
25	235	185	160	135	120	150
35	285	225	190	160	150	175
50	360	270	235	200	180	215
70	440	325	285	245	225	265
95	520	380	340	295	265	310
120	595	435	390	340	310	350
150	675	500	435	390	355	395

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОМАШИНО- И АППАРАТОСТРОЕНИИ

Индукция B, Т	Напряженность магнитного поля, H, А/м				
	Электротехническая сталь 1211 (Э11)	Электротехническая сталь 1512 (Э42)	Мягкая кованая сталь Ст2	Чугун	Пермаллой 65НП
0,05	—	—	40	420	—
0,1	—	—	80	600	—
0,15	—	—	120	750	—
0,2	87	21	160	900	—
0,25	100	25	200	1050	—
0,3	113	29	240	1220	—
0,35	126	33	280	1430	—
0,4	140	37	320	1640	—
0,45	155	42	360	1910	—
0,5	171	48	400	2200	—
0,55	190	55	443	2550	—
0,6	211	63	448	2940	—
0,65	236	73	535	3420	—
0,7	261	84	584	3920	—
0,75	287	96	632	4600	—
0,8	318	110	682	5400	—
0,85	352	125	745	6300	—
0,9	397	140	798	7360	—
0,95	447	160	860	8600	—
1,0	502	185	924	10 100	—
1,05	570	220	994	12 000	—
1,1	647	260	1090	14 000	—
1,15	739	310	1187	16 500	—
1,2	843	380	1290	19 200	—
1,25	976	490	1430	22 500	—
1,3	1140	680	1590	26 200	31
1,35	1340	1000	1810	30 300	500
1,4	1580	1450	2090	34800	1062
1,45	1950	2200	2440	40900	1625
1,5	2500	3100	2890	47800	2250
1,55	3280	4200	3430	36200	—
1,6	4370	5600	4100	—	—
1,65	5880	7400	4870	—	—
1,7	7780	9500	—	—	—
1,75	10 110	11 900	—	—	—
1,8	12 800	14 600	—	—	—
1,85	15 900	18 300	—	—	—
1,9	19 700	23 000	—	—	—
1,95	24 600	29 000	—	—	—
2,0	31 000	41 000	—	—	—

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава первая. Электрическое поле и конденсаторы	5
1-1. Силы электрического поля. Напряжение и потенциал	5
1-2. Конденсаторы, их емкость. Электрическая прочность изоляции	13
Глава вторая. Электрические цепи постоянного тока	19
2-1. Электродвижущая сила и напряжение на выводах источника э. д. с. Работа и мощность в электрической цепи	19
2-2. Преобразование электрической энергии в тепловую. Закон Джоуля — Ленца. Закон Ома	23
2-3. Нагревание проводов. Выбор сечений проводов по таблицам допустимых нагрузок и потере напряжения. Выбор плавких предохранителей	26
2-4. Работа источника питания на цепь с переменным сопротивлением. Соединение сопротивлений (последовательное, параллельное и смешанное). Законы Кирхгофа	36
2-5. Последовательное, параллельное и смешанное соединения источников э. д. с. Расчет сложных цепей	51
Глава третья. Электромагнетизм	65
3-1. Электромагнитная сила. Магнитное поле тока в прямом проводе, кольцевой и цилиндрической катушках. Индуктивность	65
3-2. Ферромагнитные вещества и их намагничивание. Магнитная цепь и ее расчет	70
3-3. Явление электромагнитной индукции. Взаимное преобразование механической и электрической энергии. Явление самоиндукции	83
Глава четвертая. Электрические машины постоянного тока	95
4-1. Понятие об обмотке якоря. Понятие о коммутации. Электродвижущая сила в обмотке якоря. Электромагнитный вращающий и тормозной моменты	95
4-2. Генераторы постоянного тока и их характеристики	100
4-3. Электродвигатели постоянного тока и их характеристики	108
	301

Стр.

Глава пятая. Основные понятия переменного тока 114

5-1. Генерирование переменного синусоидального тока. Способы изображения синусоидальных величин. Частота, фаза, сдвиг фаз 114

Глава шестая. Электрические измерения и приборы 120

6-1. Измерение тока, напряжения и сопротивлений. Погрешности. Классы точности измерительных приборов 120

6-2. Системы измерительных приборов. Действующие значения тока и напряжения. Применение приборов разных систем для измерения тока, напряжения, сопротивления, мощности, угла сдвига фаз, расхода энергии. Измерение неэлектрических величин электрическими методами 127

Глава седьмая. Цепи переменного тока 135

7-1. Неразветвленная цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Резонанс напряжений 135

7-2. Коэффициент мощности и его технико-экономическое значение. Разветвленная цепь переменного тока 152

Глава восьмая. Трехфазные цепи 166

8-1. Электродвижущие силы, индуктированные в обмотках трехфазного генератора. Соединение электроприемников в звезду, назначение нейтрального (нулевого) провода 166

8-2. Трехпроводная трехфазная цепь при соединении электроприемников в звезду и в треугольник. Заземления и зануления Коэффициент мощности, повышение его 177

8-3. Падение и потеря напряжения в проводах сети переменного тока. Расчет сечения проводов по потере напряжения 185

Глава девятая. Цепи со сталью и трансформаторы 188

9-1. Цепи переменного тока со сталью. Реакторы 188

9-2. Однофазный трансформатор. Холостой ход и работа трансформатора под нагрузкой 193

9-3. Трехфазные трансформаторы, группы соединения их. Параллельная работа трансформаторов 202

9-4. Автотрансформаторы. Трансформаторы тока и напряжения 212

Глава десятая. Электрические машины переменного тока 216

10-1. Вращающееся магнитное поле статора. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя 216

10-2. Рабочий процесс и характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 223

10-3. Рабочий процесс и характеристики трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором 229

10-4. Синхронные машины. Основные понятия 232

Стр.

Глава одиннадцатая. **Электропривод и аппаратура управления** 237

11-1. Выбор мощности электродвигателя 237
11-2. Аппаратура управления электродвигателями 239

Глава двенадцатая **Основы электроники** 245

12-1. Термоэлектронная эмиссия. Двухэлектродная лампа и ее характеристики. Ламповые выпрямители 245
12-2. Фильтры 250
12-3. Триод, многоэлектродные лампы. Усилители, генераторы 252
12-4. Полупроводниковые приборы 257

Глава тринадцатая. **Ответы к задачам** 260

Приложения 295

Эммануил Абрамович Рабинович

СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Редактор Т. Н. Платова
Редактор издательства И. В. Антик
Переплет художника А. А. Иванова
Технический редактор Л. А. Молодцова
Корректор И. А. Володяева
ИБ № 2017

Подписано к печати 22.09.78. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Гарн. шрифта литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 15,96. Уч.-изд. л. 19,52. Доп. тираж 60000 экз. Зак. № 796. Цена 90 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000 гор. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7.

PHOTOS BY ANDREY G AKA DONUT190